

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГАОУ ВО «Российский государственный  
профессионально-педагогический университет»

**С. В. Анахов**

**ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ПЛАЗМОТРОНОВ**

Екатеринбург  
РГППУ  
2018

УДК 621.387.143

ББК 3292.6-5-02

А64

**Анахов, Сергей Вадимович.**

А 64 Принципы и методы проектирования плазмотронов]: монография / С. В. Анахов. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 165 с.

ISBN 978-5-8050-0662-4

Анализируются принципы и методы проектирования плазмотронов в технологиях резки, сварки и переработки отходов. Представлены конкретные примеры, иллюстрирующие основные положения, лежащие в основе проектирования и использования таких технологий. Рассмотрены области применения и перспективы использования плазмотронов в различных электроплазменных технологиях, а также классификация плазмотронов по различным технологическим и конструктивным признакам. Приведена методика проектирования металлорежущих плазмотронов. Представлены критерии эффективности проектирования и применения плазмотронов в электроплазменных технологиях. На основе данных критериев предложен квалиметрический метод оценки эффективности проектирования плазмотронов.

Предназначена студентам, аспирантам, преподавателям..

УДК 621.387.143

ББК 3292.6-5-02

Рецензенты: Ю. А. Пыкин, доктор технических наук, профессор (ФГАОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»), генеральный директор (ООО НПО «Полигон»); Б. Н. Гузанов, доктор технических наук, профессор (ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

Работа выполнена в рамках проекта №13.10317.2018/11.12 на проведение НИР по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

ISBN 978-5-8050-0662-4

© ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2018

## Оглавление

Введение.....	5
1. Область применения и перспективы использования плазмотронов для обработки материалов.....	10
1.1. Плазменная разделительная резка металлов.....	10
1.2. Перспективы использования плазменной техники в экологических целях.....	16
1.2.1. Переработка техногенных металлосодержащих отходов.....	16
1.2.2. Утилизация отходов производства и потребления.....	18
1.2.3. Комплексный подход к проблеме безопасности .....	23
2. Методы и принципы конструирования плазмотронов для обработки материалов .....	24
2.1. Принципы классификации электроплазменного оборудования .....	24
2.2. Основные принципы проектирования электроплазменного оборудования.....	31
2.3. Методы проектирования электроплазменного оборудования .....	35
2.3.1. Эвристические методы .....	39
2.3.2. Формализованные методы .....	52
2.3.3. Экспериментальные методы .....	67
3. Основы проектирования плазмотронов для плазменной сварки .....	74
3.1. Физические основы плазменной и микроплазменной сварки.....	74
3.2. Принципы и методы проектирования плазмотронов для сварки.....	78
4. Принципы и методы проектирования плазмотронов для утилизации отходов.....	92
4.1. Системные принципы в решении задач экологической безопасности плазменными методами .....	92
4.2. Принципы и методы проектирования плазмотронов для обезвреживания отходов.....	94
5. Критерии эффективности проектирования и применения плазмотронов для резки металлов .....	103
5.1. Параметры эффективности в технологиях плазменной резки и сварки .....	103
5.2. Квалиметрический метод оценки эффективности проектирования плазмотронов .....	125
6. Методика автоматизированного проектирования металлорежущих плазмотронов по газодинамическим, теплофизическим и акустическим критериям.....	131
6.1. Введение в методику.....	131
6.2. Построение модели проектирования .....	133

6.3. Проектирование по газодинамическим критериям .....	135
6.4. Проектирование по теплофизическим критериям .....	142
6.5. Проектирование по критериям акустической безопасности .....	147
6.6. Проектирование технологии и вспомогательного оборудования .....	150
Заключение .....	152
Библиографический список.....	154
Приложение. Информационно-справочные модели плазменного обо- рудования .....	160



## Введение

В широком ряду процессов, имеющих большой инновационный потенциал, но требующих непрерывной модернизации, а значит, и постоянных научно-технических исследований, достойное место занимают технологии, основанные на применении генераторов низкотемпературной плазмы – плазмотронов. Такие технологии в наиболее широком толковании называют электроплазменными (ЭПТ) и относят к сварочным и родственным им технологиям, развитие которых в последние годы характеризуется внедрением наукоемкой продукции, разработанной на основе достижений в области фундаментальных наук [1, 2]. В утвержденном в 2010 г. национальном стандарте РФ ГОСТ Р ИСО 4063–2010 к электроплазменным технологиям отнесены процессы 15 «Сварка дуговая плазменная» (в международной номенклатуре – PAW [3]), 83 «Резка плазменная» (РАС) и 88 «Строжка плазменная» (PG).

В основе электроплазменных технологий лежат процессы, основанные на применении низкотемпературной (5–30 тысяч градусов) плазмы. Долгое время внедрение таких технологий сдерживалось рядом факторов:

- 1) материаловедческим – низкой стойкостью конструктивных элементов плазмотронов, вынужденных работать при высоких токах плазменной дуги;
- 2) энергетическим – высокой потребляемой электрической мощностью;
- 3) тяжелыми условиями работы персонала: подверженностью в дополнение к риску поражения электрическим током в отдельных случаях еще и повышенному шумовому, газоаэрозольному, ультрафиолетовому и электромагнитному воздействию.

К концу XX в. большая часть этих проблем была решена. Низкотемпературная плазма стала важным элементом современных производств, позволяя вести процессы с небывало высокими скоростями, недостижимыми при других технологиях [4]. Здесь следует упомянуть плазменную плавку, резку и упрочнение металлов, плазмохимию, спецметаллургию, решение экологических проблем, получение новых чистых материалов, ультрадисперсных и специальных порошков, нанесение пленок и покрытий вакуумно-плазменным методом и т. д. Результатом большого разнообразия областей применения (и, следовательно, требований к плазменной

струе и генератору) плазмы стала разработка широкой номенклатуры плазмотронов, различающихся по конструктивному оформлению и применению в рабочем процессе. В зависимости от формы электрического разряда, используемого для генерации плазмы, различают электродуговые, высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны, а также генераторы на электромагнитных колебаниях оптического диапазона частот – оптических разрядах и потоках частиц высоких энергий – пучковый разряд [5]. Наибольшее распространение в настоящее время получили электродуговые генераторы плазмы, которые и являются предметом анализа данной книги. В настоящее время разработано большое количество электродуговых плазмотронов для самых разных целей [5, 6]. Они применяются для нагревания газа в аэродинамических трубах и плазмохимических реакторах, для решения аэрокосмических задач, прямого восстановления металлов из руд, интенсификации доменных и мартеновских процессов в металлургии. Плазмотроны используются как инструмент для термического бурения горных пород, при спектрометрических исследованиях, для получения стабильного эталона излучения, в качестве реактивных двигателей малой тяги для космических аппаратов и т. д.

В настоящее время существует целый ряд государственных промышленных приоритетов, в реализации которых плазменные технологии могут сыграть существенную роль. Как известно, первым и наиболее распространенным направлением использования плазмотронов является их применение в процессах разделки металла и металлолома. Плазменная резка металлов – одна из наиболее востребованных операций в технологии производства сварных соединений. Особенно велика роль плазменной резки в заготовительных технологиях при подготовке кромок соединительных деталей для последующей сварки. В настоящий момент существует большой выбор металлорежущих плазмотронов различного функционального назначения и конструктивного исполнения, как отечественных, так и зарубежных исполнителей. По некоторым позициям (скорости резки, себестоимости и безопасности) отечественные плазмотроны и вспомогательное оборудование имеют сопоставимые с зарубежными аналогами характеристики, но в большинстве случаев сравнительные параметры импортной продукции имеют лучшие показатели, чем российской (по материалу- и энергопотреблению, параметрам качества, степени автоматизации и даже дизайну устройств и установок). Среди разработок отечественного электроплазменного оборудования практически отсут-

ствуют инструментальные плазмотроны для прецизионной резки (технология сжатой или узкоструйной плазмы), обеспечивающие повышенную точность и качество реза кромок, высокую материальную и энергоэффективность. По этой причине разработку энергоэффективных плазменных технологий с современными системами автоматического управления можно отнести к сфере задач направлений TechNet и EnergyNet Национальной Технологической Инициативы (НТИ) и Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Второстепенное внимание уделяется и критериям безопасности работы, из-за чего уровень звуковой мощности большинства плазмотронов для резки превышает нормируемые значения на 15-30 дБ. Кроме того, существует значительный с технологической и экономической точки зрения разрыв между двумя современными технологиями резки тонких листов – лазерной и воздушно-плазменной, не позволяющий обеспечивать необходимую точность и скорость реза при определенных толщинах листа.

Отметим, в добавление к вышесказанному, что наблюдается и сужение сферы применения технологий плазменной и микроплазменной сварки, доля которых в суммарном объеме сварочных технологий по некоторым данным в настоящее время составляет 2–3 % [1]. По всей видимости, это связано также с отсутствием внимания к разработке соответствующего плазменного оборудования, из-за чего оно по стоимости и скорости выполнения процесса проигрывает автоматической дуговой сварке. Наибольших успехов во внедрении таких технологий добился УралНИТИ (Уральский научно-исследовательский технологический институт, Екатеринбург), однако большая часть используемого оборудования конструктивно аналогична разработкам 1980-х гг. ВНИИЭСО и ИЭС им. Е. О. Патона.

Появление упомянутых проблем отчасти связано с тем, что в последние годы в конструировании плазмотронов отечественными производителями наметился весьма существенный крен в направлении исследований и разработки мощных плазменных нагревателей, плазмохимических реакторов и металлургических плазмотронов [7, 8], применяемых, как правило, для высокотемпературных химических превращений и утилизации отходов. Несмотря на высокий уровень и научный приоритет данных разработок, их внедрение в настоящий момент из-за существенной энергоемкости технологий недостаточно распространено. В то же время в области плазменной резки и сварки предлагаемые модели лишь незначительно отличаются от разработанных еще в 1980-е гг. плазмотронов во ВНИИЭСО,

ВНИИАвтогенмаше и ИЭС им. Е. О. Патона (ВНИИЭСО – Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт электросварочного оборудования; ВНИИАвтогенмаш – Всероссийский научно-исследовательский институт, выполняющий комплексные исследования, разработку и внедрение аппаратуры, машин и технологий термической резки, газотермических покрытий и газоплазменной обработки материалов; ИЭС им. Е. О. Патона – Институт электросварки им. Е. О. Патона). Как уже отмечено, фактически вне рамок разработки и исследований оказалась появившаяся в последние 10 лет у зарубежных производителей (Hyperterm, Kjellberg, Messer Greisheim) технология так называемой точной, или сжатой, плазмы (процесс 834 «Резка плазменная высокоточная» по ГОСТ Р ИСО 4063). Отечественных аналогов подобной технологии практически нет, а проводимые по ней исследования опираются, как правило, на продукцию упомянутых выше производителей. В результате традиционные отечественные плазменные технологии для резки оказываются менее конкурентоспособными не только по сравнению с иностранными, но и по отношению к другим процессам резки (лазерным, механическим, гидроабразивным), имеющим свой потенциал внедрения, особенно при разделке металлов малых толщин.

Преодолеть упомянутое технологическое отставание можно путем модернизации устаревших и создания новых технологий. Развитие любой технологии неизбежно проходит две стадии: научно-исследовательскую (НИОКР) и внедренческую; соответствующие работы могут выполняться различными структурами в разные промежутки времени. Существенные затраты на научные исследования, которые зачастую несет предприятие, стремящееся своими силами развивать и внедрять новую технологию, должны быть обоснованы внедренческой перспективой и, в оптимальном варианте, поддержаны государственными структурами, определяющими приоритеты научно-технического развития в масштабах всей страны.

Совершенствование любой ЭПТ должно начинаться с улучшения параметров работы основного ее элемента – плазмотрона, что достигается путем проектирования и конструирования его основных узлов. Любая проектная деятельность подразумевает соблюдение определенных принципов (от лат. *prīncipiūm* — первоначало, основа) и методов (способов практического достижения определенной цели), которые могут иметь свою специфику, в зависимости от проектируемой технологии и оборудования. Известные принципы проектирования оборудования связаны в первую оче-

редь с задачами повышения его функциональных характеристик: производительности, качества и надежности [9, 10]. Решения такого рода обычно патентуются, а производители и разработчики плазмотронов, как правило, предпочитают давать информацию о конструктивных и технологических особенностях предлагаемого ими оборудования в самых общих чертах, не раскрывая используемых «ноу-хау», и принимают меры для того, чтобы предотвратить разборку и исследование его наиболее важных узлов. В результате информация о функционировании плазмотрона в целом, конструкции его отдельных элементов, газодинамических, теплофизических и электродинамических характеристиках оказывается труднодоступной.

Отметим также, что сегодня при анализе современных результатов конструирования в ЭПТ наблюдается широкое использование формализованных процедур, численного моделирования процессов, принципы же системного и оптимального проектирования остаются практически без внимания. В результате полученные решения оказываются применимы для анализа конкретной конструкции и технологии, но малопригодны для нахождения оптимальных и эвристических решений. Кроме того, в ходе проектирования электроплазменного оборудования зачастую возникают задачи со взаимно противоречивыми результатами. К такой проблеме, например, приводит стремление сконструировать плазмотрон максимально эффективный по тепловым, динамическим и электрическим параметрам и при этом с высоким уровнем безопасности по критериям шума, излучения и газовыделения, а также электробезопасности. Очевидно, что при решении подобных задач необходимо опираться на методы поиска оптимальных результатов и использовать системный подход, т. е. учитывать большинство технологически и экологически важных критериев. Умение использовать широкий арсенал различных принципов и методов проектирования плазмотронов даёт возможность быстрее и эффективнее находить новые конструктивные решения, а также новые сферы применения для зарекомендовавших себя базовых решений. Например, отталкиваясь от эффективных конструкторских разработок для дуговых металлорежущих плазмотронов постоянного тока можно, опираясь на методы модификации и инверсии, разрабатывать плазмотроны для сварки и плазменной утилизации отходов различного класса опасности, решая тем самым не только технологические, но и экологические и социальные проблемы.

# **1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

## **1.1. Плазменная разделительная резка металлов**

Среди всего комплекса плазменных технологий особого внимания заслуживает *разделительная резка металлов*. Это обусловлено потребностями оборонных, топливно-энергетических, машиностроительных, металлургических, транспортных и других отраслей промышленности, где необходим массовый раскрой металлопроката. Помимо увеличения объемов производства существенным фактором последних лет является успешное развитие кибернетики и автоматики, повысившее производительность процессов, точность изготовления детали, а также упростившее труд резчика. Все большая роль на современных производствах отводится операции подготовки кромок соединяемых деталей для сварки (до 70 % листового металлопроката), в которой разделка кромок стыка – одна из важнейших функций машин термической резки. Особую роль занимает плазменная разделка на металлолом военной техники и объектов гражданского и специального назначения, поскольку в этом случае одновременно решаются как экономические, так и экологические проблемы, остро стоящие перед урбанизированными и индустриально нагруженными территориями.

Как правило, в данной технологии используются так называемые плазменные плазмотроны, в которых полезная теплота выделяется на одном из опорных пятен дуги, вынесенном на нагреваемое и включенное в электрическую цепь изделие. В этом случае полезной оказывается и высокая кинетическая энергия плазменной дуги (струи), обжатой потоком воздуха или какого-либо газа, проходящего на высокой скорости через сопло плазмотрона. Электрическая дуга и ионизированный газ способны за счет высокой температуры и кинетической энергии разрезать любой электропроводный материал быстро и точно, не нагревая его обширные участки. В отдельных случаях (при разделке неэлектропроводных материалов) применяются и струйные плазмотроны, в которых дуга горит внутри плазмотрона.

Оценивая возможности и преимущества современного плазменного оборудования в сравнении с другими устройствами и технологиями, использующими способы высокоэнергетического воздействия на материалы (газопламенное, лазерное, водоабразивное и т. д.), можно отметить следующие положительные стороны осуществляемого с их применением процесса:

- высокие скорости резки (в 2–3 раза превышающие лазерную и в 6–8 раз кислородную резку (в зависимости от толщины металла)) и прожига металла без необходимости предварительного нагрева;

- широкий диапазон толщин разрезаемого металла (от 0,5 до 180 мм в зависимости от материала; особенно эффективна разделка металлов толщиной до 35 мм, а это около половины всего металлопроката [11]);

- возможность резать любые токопроводящие материалы (в том числе тугоплавкие металлы и пакеты листового металла), вне зависимости от их состояния и формы поверхности;

- отсутствие окалины на разрезаемом металле, что исключает механическую обработку, а следовательно, экономит время и снижает трудозатраты;

- малая зона термического влияния, обеспечивающая высокую точность реза (до 0,1 мм) и отсутствие коробления тонких листов, а при использовании порталных машин с программой оптимизации раскроя – высокий коэффициент использования металла (до 80...86 %);

- высокий ресурс работы оборудования (срок службы плазменной головки приблизительно в 3 раза больше, чем газовой);

- возможность использования как ручных, так и механизированных процессов;

- экономия за счет использования сжатого воздуха вместо дорогостоящих газов;

- безопасность, что является результатом применения современных плазмотронов и обусловлено отсутствием горючих, взрывоопасных газов и открытого пламени, а также использованием различных способов и методов защиты от вредных факторов плазменных производств;

- большая производительность и низкая стоимость процесса в пересчете на разрезанный метр (это интегральный фактор, обеспечивающий преимущество плазменной резки металлов толщиной свыше 1 мм): как свидетельствует опыт, несмотря на относительно высокое энергопотребление (15–25 кВт на плазмотрон), в 2–3 раза более высокая скорость плазменной резки обеспечивает большую эффективность разделки по сравнению с другими методами (газовыми, механическими и т. д.).

Известно, что первые отечественные комплектные установки для воздушно-плазменной резки (ВПр) металлов были созданы в конце 1960-х – начале 1970-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона (АВПр-1 с плазмотронами ВПр-9 мощностью до 100 кВт и ВПр-10 мощностью до 50 кВт) и ВНИИЭСО<sup>1</sup> (АПр-401 с плазмотроном ПВР-402). Эти установки успешно применялись при плазменной резке металлов средних толщин (до 60 мм). Тогда же были созданы и первые плазмотроны для поверхностной плазменной резки (строжки). Среди недостатков первых конструкций плазменных резаков можно отметить невысокую стойкость катодов, особенно при резке металлов на больших токах, интенсивное выделение аэрозолей, повышенный шум, ограниченные возможности резки со скосом кромки [11]. Кроме того, следует учесть сложность оборудования (нужен источник питания с системой управления и охлаждения) и обслуживания, а также необходимость высокой квалификации у резчика.

В 1980-е гг. была создана целая серия аппаратов для разделительной резки. Помимо упомянутых выше разработчиков исследованиями в области плазменных технологий активно занимались Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет [8, 12, 13, 14], Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе [6, 7] и ИТПМ СО РАН<sup>2</sup> [15, 16, 17, 18, 19]), Институт проблем электрофизики и электроэнергетики РАН в Санкт-Петербурге [20], Институт высоких температур (ныне – ОИВТ) АН СССР [21], Исследовательский центр имени М. В. Келдыша. В разработке плазменной техники принимали участие и научно-исследовательские структуры ряда советских и российских вузов: Петрозаводского государственного университета, Пермского и Томского национальных политехнических университетов, Сибирского федерального университета (Новосибирск) и др. Разумеется, в каждом из них исследования велись в рамках специфичного для него направления, но в результате, тем не менее, сформировался мощный поток теоретических исследований и было выпущено и внедрено большое количество электроплазменных установок практически по всему спектру упомянутых выше технологий.

С начала 1990-х гг. в разработке и производстве такой техники стал возрастать удельный вес небольших научно-исследовательских объедине-

---

<sup>1</sup> В настоящее время «Институт сварки России».

<sup>2</sup> ИТПМ СО РАН – Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.



ний и коммерческих структур, благодаря чему спектр предлагаемой продукции был существенно расширен. Так, например, появились разработки, учитывающие упомянутый выше фактор акустической безопасности – плазмотроны серии ПМВР для механизированной резки и РПВ для ручной (НПП «Полигон», Екатеринбург). Среди имеющихся в данный момент на рынке предложений по электродуговым плазмотронам отметим разработки отечественного производства: плазменные резаки и аппараты для ВПР «Мультиплаз» (Москва), плазмотроны для механизированной и ручной газоплазменной резки ТД-300 ПКФ «Кристалл» (Санкт-Петербург), ВПР-210, -410 и -450Р («Плазматехкомплект», Екатеринбург), П2-140, -180 и -400ВР, ПЗ-400ВА, РПВ-101 (ПУРМ, ООО «КСТ-Авиа», Москва), РПВ-401 (ЗТМ, Екатеринбург), ПРВ-301 («Спектр-Плюс», Санкт-Петербург) и др. (рис. 1.1).

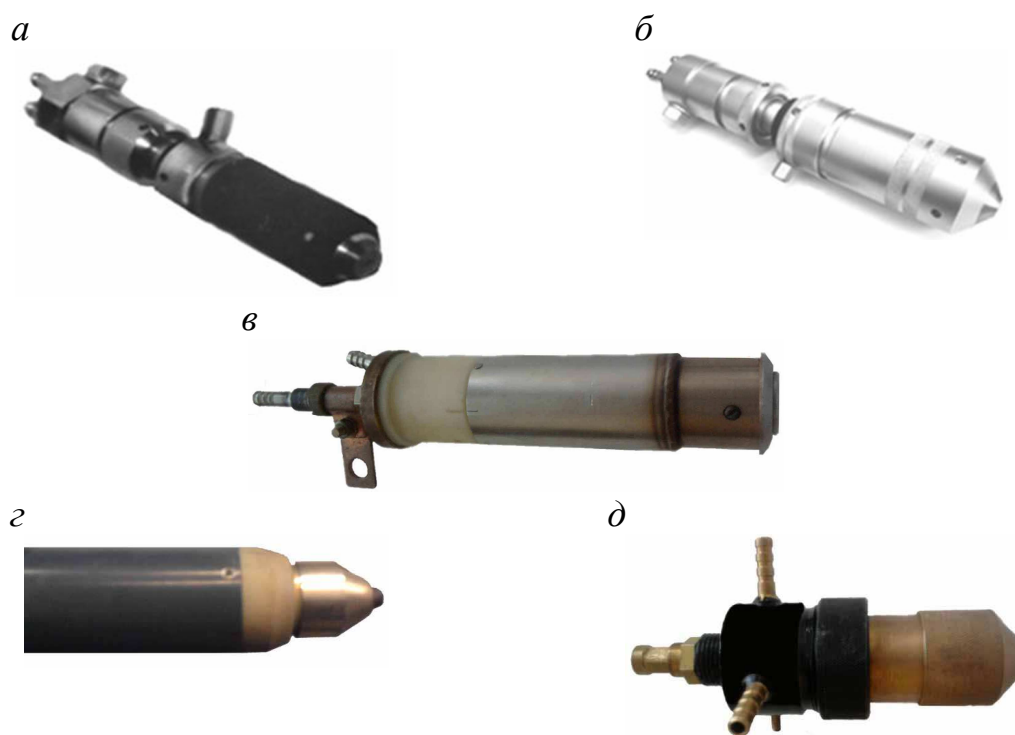


Рис. 1.1. Плазмотроны для резки металлов:

*а* – ПМВР-М; *б* – ВПР-410; *в* – ПВ РПВ-401; *г* – РВ-S 45W; *д* – ПЗ-400ВА

По-прежнему на российском рынке присутствует продукция компаний из бывших советских республик (стран СНГ): серийно выпускаемый с 80-х гг. XX в. в г. Степанаван (Армения) на заводе высокоточного электрооборудования плазмотрон ПВР-402У4, а также плазменные механизированные (ПМР-74, -75 и ПРВ-101У4) и ручные (ПРВ-202У3, -401У4) резаки того же предприятия. Разработки ИЭС им. Е. О. Патона теперь предлагают

предприятия из Киева – Опытный завод электросварочного оборудования (резаки ВПР-9, -10, -11) и НПП «Плазмотрон» (ВПР-5, -6, -7). Среди упомянутого оборудования есть действительно современные аппараты, сопоставимые по характеристикам с зарубежными моделями соответствующего функционального назначения, но присутствуют и слегка модернизированные аналоги разработок 1970-х и 1980-х гг. Параметры вышеприведенных плазмотронов можно найти на сайтах производителей и в обзорной литературе [7, 8, 11, 22]. Отметим, однако, что все они имеют, в целом, небольшой разброс по толщине и номенклатуре разделяваемого металла.

Современный рынок электроплазменных установок и плазмотронов по сравнению с 80–90-ми гг. XX в. дает широкую возможность знакомства с продукцией ведущих зарубежных производителей данного вида техники. Среди предлагаемых технологий отметим, в первую очередь, технологию точной, или сжатой, плазмы (серия аппаратов плазменной резки HiFocus (Kjellberg) и EASYTHERM (Messer Greisheim) – Германия, а также HyPerformance (Hypertherm, США)). Данная технология в настоящий момент фактически закрывает значительный с технологической и экономической точки зрения пробел между двумя известными методами разделки тонколистового металла – лазерной и воздушно-плазменной [22], обеспечивая наилучшее качество разделяемых поверхностей, экономию металла и электроэнергии. Следует сказать, что отечественных аналогов подобной технологии практически нет, а проводимые по ней исследования опираются, как правило, на продукцию упомянутых выше производителей. Разумеется, номенклатура продукции данных фирм гораздо богаче и ориентирована на широкий спектр потребностей и возможностей потребителей. Упомянем в этой связи технологии FineFocus и аппараты серий PA-S, CutFire и CUTi (Kjellberg), а также Powermax, HySpeed и MAX (Hypertherm). Отметим и продукцию для плазменной разделки других европейских фирм: из Германии – ABICOR BINZEL и TBI (аппараты TSP 60 и 120 AUT, TBI PLC 250W AUT), Швеции – ESAB (установки POWERCUT®1600 с горелками PT-26, 31 и 38) и SPT Plasmatechnik AB (аппараты серий UpperCut, Speedfire, Splitfire и Unifire), Испании – Motocono (Minicut H и V), Италии – Cebora (технологии Power Plasma, Plasma Sound и Plasma Prof), SELCO (Genesis и Sistor) и Trafimet (SACIT) с плазмотронами Ergocut SW 115, A51, CB. Широкий спектр продукции у американских производителей из США – Thermal Dynamics (технологии Ultra-Cut, Auto-Cut (O<sub>2</sub>), Cut Master A, Drag-Gun Plus), OTC Daihen (аппараты ручной резки OTC –

D12000, A-70), Lincoln Electric (установки Tomahawk с плазмотроном LC 105) и Канады – FAST CUT CNC (серии Ultra-Cut, Auto-Cut, Cut-Master и Powermax). Появляются на российском рынке и электроплазменные установки из Китая (Tianjin Coorig Technology Co. Ltd) и Японии (Koike Aronson), оборудованные, как правило плазмотронами Hypertherm или Thermal Dynamics, а также продукция фирм, специализирующихся на производстве вспомогательного оборудования: порталных машин – Eckert Cutting (Германия), источников питания – ITW (США) и защитных средств – ELECTROCOSTA (Франция). Разумеется, степень известности у вышеупомянутых фирм разная и предлагаемая ими продукция имеет свои технологические характеристики. По некоторым позициям (скорости, себестоимости и безопасности) отечественные плазмотроны и вспомогательное оборудование имеют сопоставимые с зарубежными аналогами характеристики, но в большинстве случаев сравнительные параметры импортной продукции имеют лучшие показатели, чем российской (по материалу- и энергопотреблению, параметрам качества, степени автоматизации и простоте управления и даже дизайну установок). Причем по некоторым показателям эти параметры отличаются у российских плазмотронов в худшую сторону на 20–30 %.

Сегодня существует возможность выбора между двумя видами плазменной резки. Есть устройства с высокой мощностью, сложной системой управления и большой гибкостью процесса, но требующие больших капитальных вложений. Помимо них существуют менее универсальные, но экономически эффективные и более дешевые системы (рис. 1.2).

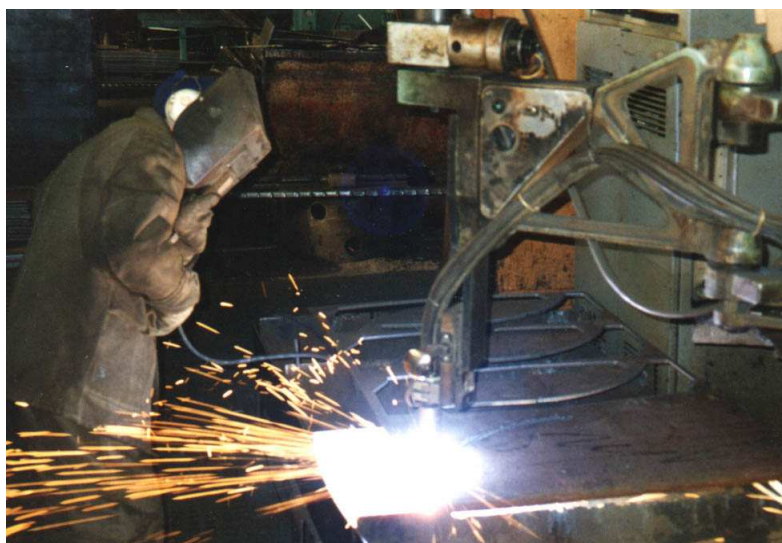


Рис. 1.2. Участок механизированной плазменной резки

Технические характеристики работы таких аппаратов приближаются к показателям, свойственным для дорогостоящего плазменного оборудования. Это дает возможность облегчить переход к их более широкому внедрению, в том числе на вновь созданных и интенсивно развивающихся предприятиях в сфере производства, использующих новые, более сложные, но и более производительные технологии.

## **1.2. Перспективы использования плазменной техники в экологических целях**

При использовании электроплазменных технологий при температурах плазменной струи  $T_{пл} > 5000 \text{ К}$  возникает эффект высокоэнергетичного воздействия на материалы, позволяющий подвергнуть глубокому разложению соединения, входящие в состав данного вещества. Тем самым становится очевидной сфера применения таких технологий: переработка промышленных и муниципальных отходов, являющаяся на данный момент одной из самых актуальных задач в экологии. Эффективное внедрение плазменных технологий в производства по переработке отходов подразумевает учет критериев производительности, себестоимости и безопасности процесса, а также качества достигаемого в ходе его осуществления результата.

### **1.2.1. Переработка техногенных металлосодержащих отходов**

Рассмотрим наиболее развитую на настоящий момент электроплазменную технологию, широко применяемую во многих странах мира. В ее основе лежит традиционный метод плазменной резки, позволяющий ручным и механизированным способом демонтировать металлоконструкции и разделять в транспортный габарит корпуса судов, самолетов, объектов военного и специального назначения для последующей их утилизации в виде металлолома (рис. 1.3).

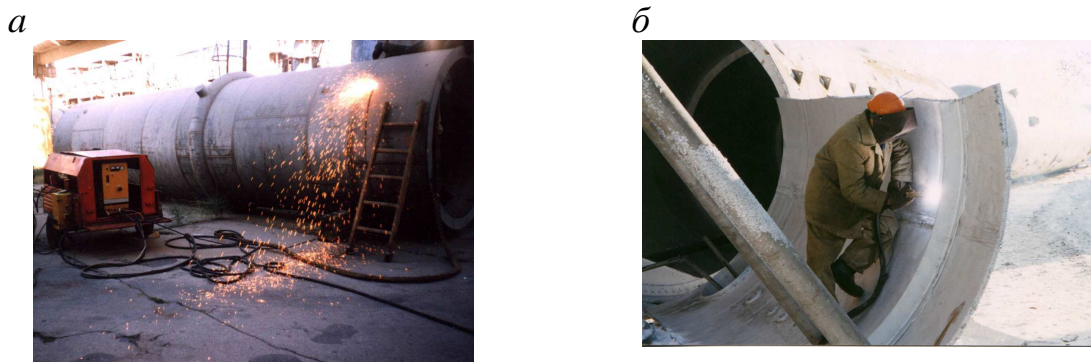


Рис. 1.3. Плазменная утилизация металлообъектов:

*а* – резка спецобъектов; *б* – резка авиаракетной техники

Для работы в полевых условиях используются мобильные установки для ручной резки плазмотронами мощностью до 50–60 кВт (рис. 1.4) в перемещаемом контейнерном или передвижном (на базе прицепов) исполнении, при разделке металлолома в стационарных условиях – автоматизированные комплексы с электродуговыми плазмотронами мощностью в несколько сот киловатт, а в некоторых случаях – со специализированными плазмотронами мегаваттной мощности. Сравнительными преимуществами технологии являются возможность разделки металлов любого сортамента с максимальной толщиной до 100 мм, отсутствие необходимости применять дорогостоящие газы, высокая скорость и производительность резки, низкая себестоимость (в расчете на метр реза). К недостаткам относят необходимость использования источника питания, компрессора и системы водоохлаждения (для мощных плазмотронов), а также применения мер защиты от опасных и вредных факторов – больших токов, искр, брызг и выбросов расплава, высокого уровня шума, различных видов излучений и газов.

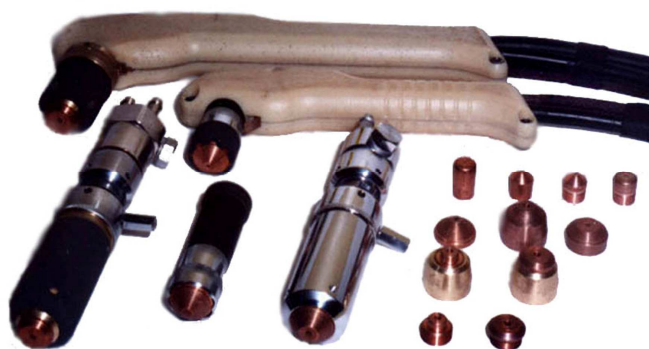


Рис. 1.4. Механизированные (ПМВР) и ручные (ПВР) плазмотроны для резки металлов

Примерами успешного внедрения данной утилизационной технологии являются, в частности, заводы General Motors в Огайо (США), Essar steel (Индия), ALCAN (Канада), перерабатывающие десятки тонн металлолома в час с использованием плазмотронов MarcII фирмы Solena мощностью 2,5 МВт. Перемещаемые комплексы различной мощности для воздушно-плазменной резки, которые предлагает на российском рынке ООО НПО «Полигон», нашли широкое применение в разделке металлоотходов разнообразного состава и качества. Следует отметить, что в мире существуют мобильные установки и для утилизации токсичных отходов неметаллического происхождения (Westihghouse Plasma Co. (США)), позволяющие избавиться от их транспортировки к месту переработки.

### 1.2.2. Утилизация отходов производства и потребления

К отходам производства обычно относят токсичные вещества (хлорорганика, радиоактивные вещества, пестициды), неорганические материалы (стеклобой, бетон), сельскохозяйственные отходы, сточные воды и т. д. Под муниципальными отходами, как правило, понимают твердые бытовые отходы (ТБО), отходы медицинских учреждений и очистных сооружений. Из-за чрезвычайно малой доли сортированного мусора большая часть отходов является смешанной и разнородной по морфологическому составу, с содержанием органических и неорганических компонентов. Применяемые в настоящее время методы их обезвреживания и утилизации (сортировка на мусороперерабатывающих заводах, захоронение с засыпкой на полигонах, сжигание на мусоросжигающих заводах, биотермическое компостирование, низко- и среднетемпературный пиролиз) не отвечают в полной мере требованиям природоохранного законодательства. Тенденцией последних лет является смещение технологических способов переработки в направлении существенного увеличения температур в зоне термического воздействия на утилизируемый материал [23]. Такой эффект достигается за счет барботажной плавки в печах Ванюкова, в электрошлаковых печах и при применении плазменных электротехнологий.

Интерес к применению плазменных технологий в сфере переработки муниципальных отходов в последние годы бурно растет. Например, в США в год патентуется до 400 разработок по данному направлению, а общее число публикаций достигает 1500. Опыт последних лет свидетельствует о переходе от стадии экспериментальных и опытных разработок к стадии промышленного внедрения плазменных электротехнологий. В качестве основных направлений такого внедрения следует отметить плазменную газификацию, обогащение сырья в промышленных отвалах, переработку высокоопасных отходов и функциональное одно- или многостадийное применение плазмотронов.

Достоинством плазмотермических устройств является возможность совместной переработки как бытовых, так и промышленных отходов. Однако внедрение любого такого устройства во многом зависит от того, насколько экономически и энергетически обоснована соответствующая технология. Эффективность высокотемпературной деструкции утилизируемых веществ достигается за счет большой мощности плазменных генераторов, что, в свою очередь, не всегда оправдывает их применение в техно-



логиях переработки отходов. Одним из выходов из такой ситуации является использование отходов в качестве постоянно возобновляемого источника энергии. ТБО и некоторые промышленные отходы содержат до 80 % углеводородного сырья, что по теплотворной способности соответствует, а иногда и превосходит свойства бурых углей. В результате, помимо плазменного пиролиза всех утилизируемых соединений с образованием простых низкомолекулярных и нетоксичных веществ появляется возможность получения синтез-газа ( $\text{CO}$  ( $25 \div 35 \%$ ) +  $\text{H}_2$  ( $35 \div 45 \%$ ) + метан, ацетилен и этилен) с теплотворной способностью  $10 \div 13 \text{ МДж/нм}^3$  [7]. Этот газ в дальнейшем можно сжигать в энергетических котлах при производстве электроэнергии (до  $1 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$  с 1 тонны ТБО) или использовать в химическом производстве, повышая тем самым энергетическую эффективность и экономическую выгоду применения плазменной технологии. Присутствие в синтез-газе монооксида углерода  $\text{CO}$  и отсутствие азота, а также малая масса газа позволяют минимизировать количество отходящих газов, а вместе с закалкой синтез-газа предотвратить образование токсичных соединений (диоксинов, окислов азота, соединений хлора, серы и т. д.). При этом шлак практически не содержит окисленных и зараженных веществ. Экологические требования в результате выполняются без использования многоступенчатых, сложных и дорогих систем газоочистки.

В качестве серийно выпускаемого оборудования подобного типа можно упомянуть продукцию фирм Recovered Energy, Inc. и Mason and Hanger National, Inc. (США), RCL (Канада), Europlasma (Франция). Фирма Solena Group (США) разработала оборудование для плазменной газификации ТБО на борту круизных судов. В нашей стране известны разработки плазменных электродов НГТУ, НПО «ЭКОС», ИТ СО РАН и ОАО «Сибэлектротерм» [7], в том числе совместно с фирмой «Самсунг». Опытно-промышленная установка для получения бензина из природного газа создана в Приморском научно-техническом центре РКК «Энергия» с участием институтов нефтехимического синтеза и высоких температур РАН. Следует, однако, отметить, что объем вырабатываемой на таких установках энергии, как правило, невелик, и вся она обычно используется в замкнутом цикле самого производства.

Плазменные технологии могут стать серьезным подспорьем и в решении еще одной важной экологической и экономической задачи: переработки отвалов горно-металлургических производств. В технологиях подобного типа используются теплофизические свойства различных компо-

нент таких отходов, определяющие разные скорости их нагрева и температуры испарения. После пропускания, как правило, порошкообразного вещества через плазменную струю его состав оказывается обогащенным пригодным для дальнейшего промышленного использования ценным металлом, а остающийся экологически безвредный остеклованный шлак может быть использован в строительстве. Подобный завод по извлечению кобальта и меди из медных шлаков на основе процесса Enviroplas фирмы Mintek (ЮАР) работает с 2001 года. Эта же технология применяется для извлечения никеля из медно-никелевых шлаков, цинка – из доменных, переработки пыли производства нержавеющей стали. Аналогичное оборудование разработано фирмами SKF (Швеция), Tetronics (Великобритания). В качестве примера российских исследований можно упомянуть разработку ООО НПО «Полигон» технологии по переработке содосульфатных отходов алюминиевых производств [24] (рис. 1.5), а также их совместный с Институтом металлургии УрО РАН проект плазмохимической технологии переработки различных молибденсодержащих материалов. К сложностям, возникающим на пути внедрения таких технологий, относятся необходимость предварительной сушки и сепарации отходов, проектирования специальной системы их дозации в плазменную струю и, разумеется, экономическое обоснование проекта.

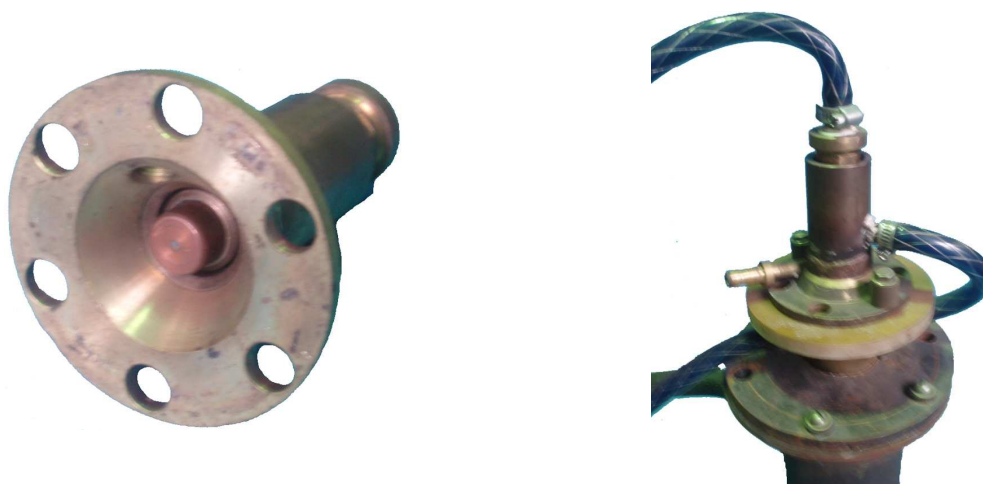


Рис. 1.5. Плазмотрон для обезвреживания порошкообразных отходов  
(в качестве элемента плазмохимического реактора)

Применение плазменных технологий без оглядки на экономическую выгоду становится жизненно необходимым при решении задач обезвреживания и утилизации отходов высокой степени опасности. Наибольшее коли-



чество исследований и разработок здесь связано с проблемой утилизации медицинских отходов. Сложный морфологический состав с металлическими фракциями, запрет на сортировку, необходимость обеспечения высоких температур для уничтожения инфицирующих компонент и мутагенной микрофлоры, жесткие требования по газовым выбросам – эти особенности медицинских отходов делают плазменные технологии наиболее эффективным инструментом решения проблемы их утилизации. В основе используемых в данном случае технологий лежит, как правило, процесс воздействия на расплав утилизируемого вещества плазменными струями с последующей очисткой отходящих газов. Эффективно данная технология реализована в разработках ЗАО «Плазма-Тест», ГУП «Экотехпром», совместном проекте Института теоретической и прикладной механики СО РАН, ООО «Огневая технология» и фирмы Dept of Environmental Sci & Tech. (Корея). Плазменное высокотемпературное окисление токсичных отходов используется в технологии, разработанной Институтом проблем электрофизики РАН. В стратегическом проекте «Управление отходами» Екатеринбурга говорится о применении разработки ООО НПО «Полигон» по обезвреживанию такого рода отходов плазменным методом на стадии дегазации после их предварительного нагрева в солевом расплаве [25] (рис. 1.6). В НПО «Радон» ведутся исследования процессов переработки радиоактивных отходов в шахтной печи с плазменным источником нагрева, демонстрирующие минимальное количество уноса опасных компонент. Серьезным достижением может стать внедрение разрабатываемых в настоящее время технологий переработки крайне вредных для человека полихлорированных бифенилов (ПХБ), присутствующих в трансформаторных маслах, соволов и совтолов.

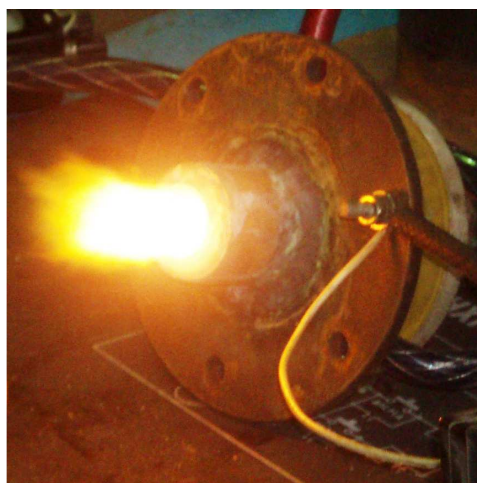


Рис. 1.6. Плазмотрон для обезвреживания материалов в рабочем режиме

Говоря о существующих технологиях плазменной переработки отходов, следует отметить, что по технико-экономическим показателям внедрение плазмотронов часто оказывается эффективным в случае их применения на отдельных стадиях сложного, как правило, многоступенчатого процесса утилизации. В некоторых разработках плазмотроны используются в плазменных реакторах для воздействия на вещество, прошедшее предварительную стадию низко- и среднетемпературного нагрева и деструкции и попадающее в плазменную струю уже в газовом или паровом состоянии (технология ООО НПО «Полигон» для переработки жидкофазных нефтесодержащих отходов [26]) либо в виде предварительно осушенных твердых компонент. Часто струей плазмотрона осуществляют процесс остекловывания образующихся шлаков и зол, что делает их практически инертными и пригодными к применению в строительных работах (технология Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (рис. 1.7)).

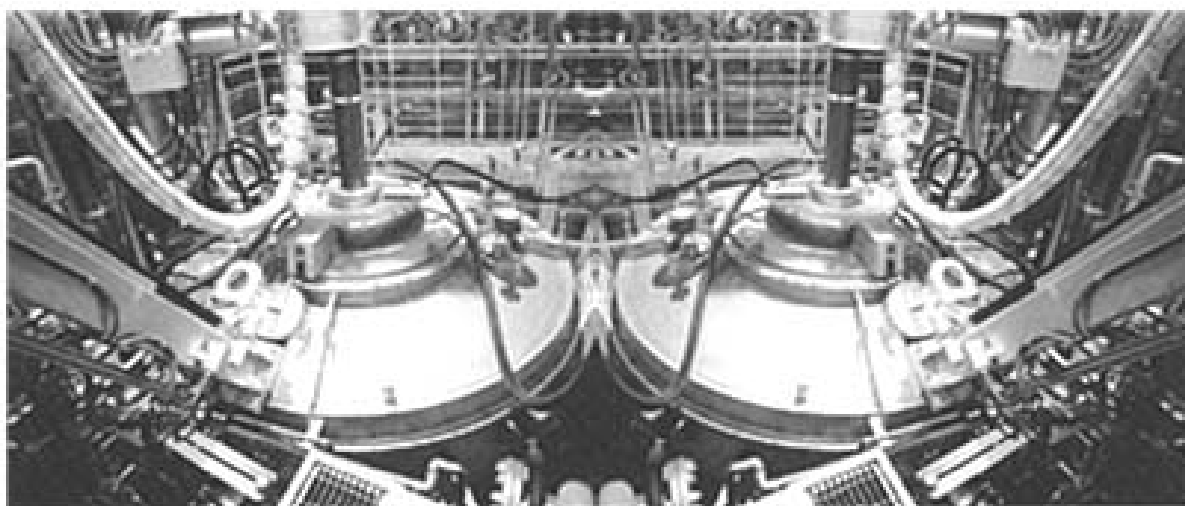


Рис. 1.7. Система плазменной переработки зольных остатков  
(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)

Наиболее эффективным является использование плазмотрона на стадии дожига образующихся после термической переработки отходов газов, что позволяет существенно упростить многоступенчатые системы их обезвреживания. В настоящее время перспективным представляется дооснащение установок по термической переработке различного вида отходов плазменными дожигателями, что повысит экологический эффект их внедрения.

### **1.2.3. Комплексный подход к проблеме безопасности**

Электроплазменные технологии, внедряемые при реализации проектов экологических производств, способны существенным и положительным образом повлиять на безопасность окружающей среды. Однако не следует забывать и о проблеме безопасности применения самих плазменных технологий [27]. Большие электрические мощности, брызги расплавленного металла (при утилизации металлоотходов) и опасность поражения плазменной дугой – все это заставляет серьезно регламентировать применение подобных технологий в соответствии с нормами производственной безопасности. В ряде случаев (при работе плазмотрона в открытом пространстве) необходимо учитывать и вредное воздействие химических (газы, пыль, аэрозоли) и физических (шум [28], электромагнитное излучение различных видов) факторов. При соответствующей адаптации разработок по методам защиты от вредных и опасных факторов электроплазменных технологий они оказываются высокоэффективными по требованиям безопасности и в случае их внедрения в проектах утилизации отходов самых разных видов.

## 2. МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1. Принципы классификации электроплазменного оборудования

Расширение сферы применения плазменных устройств ставит задачу проектирования плазмотронов, специфичных для каждой технологии. К настоящему времени разработано большое количество плазмотронов, классифицировать которые можно по целому ряду признаков: функциональных, конструктивных и параметрических. Как уже было сказано, современные плазмотроны способны работать на мощностях энергопотребления от единиц до сотен мегаватт, обеспечивая (с разным термическим коэффициентом полезного действия) преобразование электрической энергии в тепловую и кинетическую и производя тем самым термокинетическое воздействие на материалы, обладающие различной структурой и свойствами. Представленная на рис. 2.1<sup>1</sup> классификация плазмотронов является обобщающей [4, 5, 6, 7, 8, 14, 18, 19, 29, 30, 31, 32, 33, 34] (типы плазмотронов по назначению даны в соответствии с классификацией А. А. Клименко [5]).

Большинство применяемых в настоящее время для сварки, резки, напыления и т. д. плазмотронов следует отнести к категории *плазменного инструмента*. Мощность таких устройств – от единиц до сотен киловатт [6]. Более мощные (до тысяч киловатт) *плазмохимические реакторы* осуществляют процесс химических превращений в плазменной среде (получение ацетилена и этилена [16], восстановление чистых веществ из их окислов или хлоридов). *Металлургические плазмотроны* средней и большой мощности используются для переплава тугоплавких (циркония [16]) и особо чистых материалов, восстановления чистых материалов, рафинирования, получения монокристаллов и дисперсных материалов. Также средней (от десятков до сотен киловатт) мощностью обладают *плазменные нагреватели*, предназначенные для обезвреживания и утилизации отходов, розжига топок котлов и т. д. Отдельный класс составляют *научно-исследовательские плазмотроны*, применяемые для изучения и моделирования физико-технических процессов в аэродинамике, теплофизике, высокотемпературных технологиях и имеющие мощность от единиц до десятков киловатт.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее рисунки даны в редакции автора (*примеч. ред.*).



Рис. 2.1. Признаки классификации плазмотронов и их классификация

Как уже было отмечено, тенденцией последних лет является появление большого числа плазмохимических и научно-исследовательских плазмотронов различных модификаций, а среди инструментальных плазмотронов следует еще раз выделить предназначенные для реализации недавно появившейся технологии узкоструйной, или сжатой, плазменной резки.

Широта номенклатуры выпускаемых плазмогенераторов и технологий с их применением заставляет искать общие принципы, лежащие в основе их функционального использования и обуславливающие их классификацию по конструктивным признакам и параметрам. Взаимосвязь процессов, обеспечивающих стабильное выполнение соответствующей технологической процедуры, удобно рассмотреть, прибегнув к структурно-функциональному методу изучения технических объектов и исследований [35, 36]. В основе данного метода лежит представление технологической структуры как иерархической последовательности взаимосвязанных информационных устройств, что позволяет рассматривать различные технологии как эквивалентные в информационном смысле и оптимизировать их, используя принципы кибернетического управления. Разделение материи на объекты воздействия (массу, энергию и информацию) и средства воздействия – материально-энергетические комплексы – позволяет выделить процессы, обеспечивающие движение материи между средствами воздействия. Применительно к технологиям плазменной обработки материалов данная схема приобретает вид, представленный на рис. 2.2.

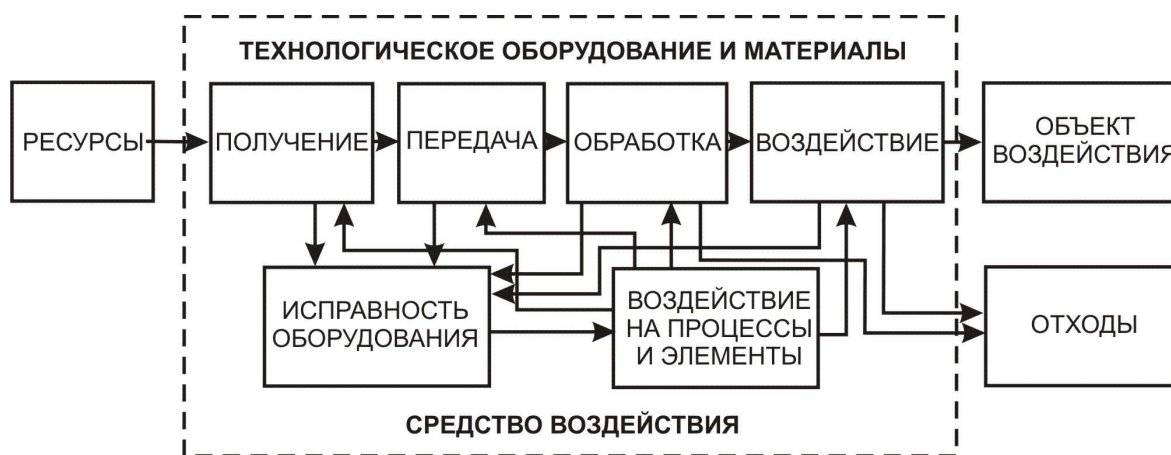


Рис. 2.2. Материально-энергетическая структура электроплазменных технологий

В качестве *ресурсов* в любой низкотемпературной плазменной технологии выступают электроэнергия и вещество, поступающее в плазмотрон в раз-



личных фазовых состояниях (плазмобразующий газ (ПОГ), охлаждающая вода, порошки, парогазовые смеси) и с разной, но не нулевой, энергией (под давлением). Объектом внешнего воздействия являются также и твердотельные материалы – в технологиях плазменной резки, сварки, наплавки. Данный признак позволяет классифицировать плазмотроны как по функциональному назначению (инструментальные и металлургические, плазменные нагреватели, плазмохимические реакторы и научно-исследовательские генераторы), так и по виду и свойствам веществ, применяемых в технологических схемах обслуживания соответствующего электроплазменного процесса (см. рис. 2.1).

*Получение и передача материалов и энергии* происходят по технологическим каналам от соответствующих систем, включенных в общую функциональную схему, в плазмотрон. На рис. 2.3 представлена материально-энергетическая схема плазменной резки металла.

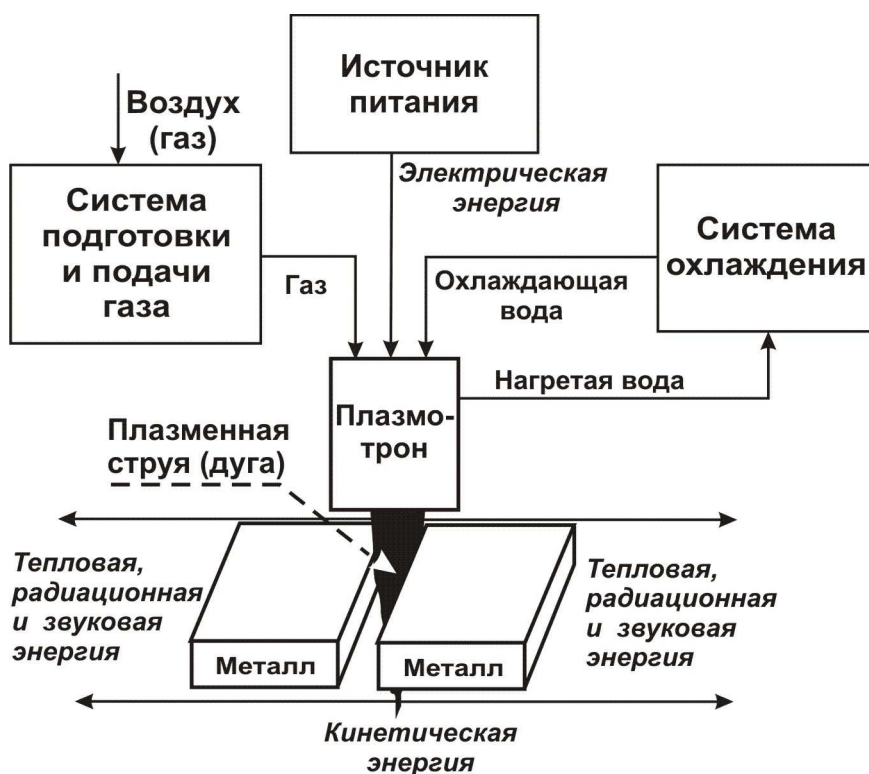


Рис. 2.3. Материально-энергетическая схема плазменной разделки металлов

Плазмотрон как элемент, выполняющий главную роль во всей технологической цепочке, представлен на рис. 2.4. Стандартными элементами такой схемы являются источник питания, обеспечивающий горение электрической дуги между катодом и анодом в сопловом узле плазмотрона,

система подготовки плазмообразующего газа, замкнутая система водяного охлаждения соплового узла и сам плазмотрон, преобразующий материальные и энергетические потоки в энергию низкотемпературной плазменной струи, воздействующей на металл.

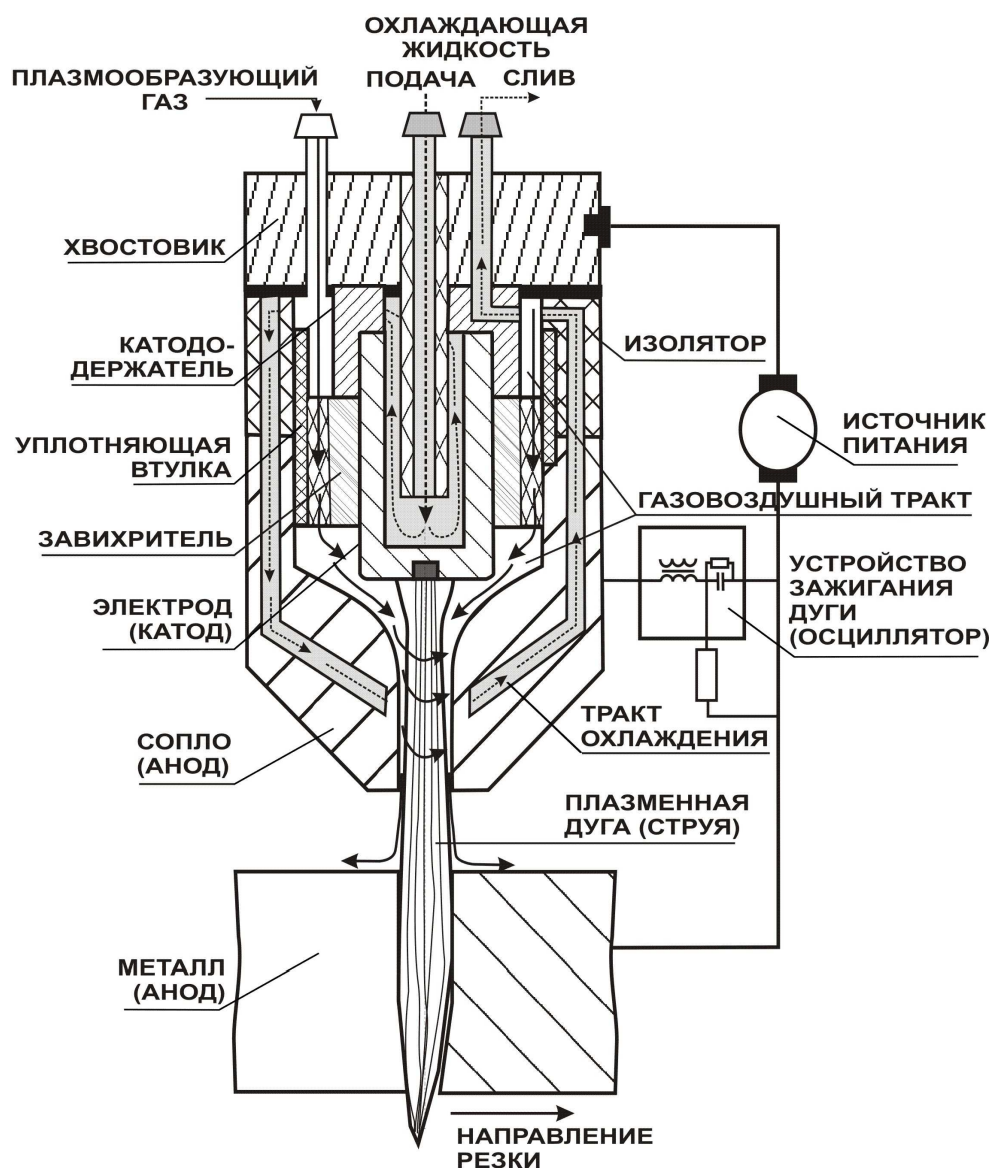


Рис. 2.4. Конструктивная схема плазмотрона для резки металла (прямая полярность)

В случае использования других технологий в схеме могут появиться дополнительные элементы, обеспечивающие поступление в плазмотрон веществ различного фазового состава (порошков, парогазовых смесей, обезвреживаемых газов и т. д.), отбор продуктов переработки, управление работой устройств и т. д.



При такой схеме должен осуществляться ручной или автоматический контроль параметров процесса – тока дуги ( $I$ ), напряжения на дуге ( $U$ ), расхода охлаждающей жидкости и плазмообразующего газа ( $Q$ ), температуры ( $T$ ) и давления ( $P$ ) газа на входе, а иногда и на выходе из системы.

В плазмотроне (см. рис. 2.4) осуществляются процессы *обработки и взаимного превращения материалов и энергии*. Газовоздушный тракт (ГВТ) плазмотрона проектируется с учетом требований минимизации аэрогидродинамических потерь плазмообразующего газа, а также обеспечения условий стабилизации горения дуги в межэлектродном пространстве. Способ подачи ПОГ в формирующей плазменной дуге (струе) сопловой узел существенным образом сказывается на эффективности всего процесса. Кинетическая энергия газового потока при его прохождении через завихритель (в плазменных резаках линейной схемы) частично преобразуется в энергию упорядоченного вращательного движения, стабилизирующего дугу, и частично – в энергию турбулентных пульсаций потока (среднее значение числа Рейнольдса по тракту  $Re \sim 10^4$ ). Возбуждение газового разряда в межэлектродном пространстве с последующей передачей электрической энергии в дугу низкотемпературной плазмы обеспечивает при условии стабильной подачи ПОГ генерацию плазменной струи на выходе из сопла плазмотрона. Широкий спектр различных способов организации разряда обуславливает большое число конструктивных решений по форме и взаимному расположению электродов, а также дополнительных систем стабилизации дуги. Эти решения, в свою очередь, определяют условия энергетического баланса. При рассмотрении данного момента полезно обратить внимание не только на термические потери [7], но и на переход определенной части энергии в энергию акустических колебаний и радиационного излучения, что оказывает негативное воздействие на рабочий персонал (*энергетические отходы*). Учет происходящих на этой стадии фазовых превращений (ПОГ – в низкотемпературную плазму, физико-химические трансформации вещества при его подаче в плазменную дугу) также позволяет классифицировать плазмотроны по функциональной направленности. Появление на этой стадии плазменного состояния вещества дает широкое поле для рассмотрения его свойств на примере анализа плазменной дуги (струи) как на качественном уровне, так и на примерах конкретных расчетов (степени ионизации, температур, скоростей, компонентного состава и т. д.) [37].

Детальное понимание происходящих на этой стадии процессов является важнейшим фактором, обуславливающим эффективность проектирования плазменных генераторов.

*Влияние на внешний объект* в большинстве плазменных технологий оказывается путем высокоэнергетичного термокинетического *воздействия* на обрабатываемый материал. Обеспечение эффективности данного процесса в соответствии с заданными параметрами качества – главный критерий выбора потребителем соответствующего устройства или технологии, а следовательно, и результативности их проектирования. Помимо условий, обеспечивающих соответствующий каждой из технологий эффект (разделка, плавление или модификация поверхности при определенных температурах и скоростях перемещения плазменной струи, температур и скоростей частиц напыляемых или имплантируемых материалов [38, 39, 40, 41, 42]), следует обратить внимание на негативные факторы, возникающие при работе плазмотрона: высокий уровень шума (до 120–130 дБ), радиационное излучение и присутствие вредных аэрозолей и газовых компонент (при работе с легированными сталями и токсичными газовыми смесями) [43, 44, 45, 46, 47]. В процессе обработки объекта воздействия образуются также *материальные отходы* (шлаки, неизрасходованные ресурсы, требующие дальнейшей обработки материалы поверхностных слоев реза и т. д.). К ним же можно отнести и конструктивные элементы плазмотронов (сопла, электроды), подлежащие замене по технологическому регламенту эксплуатации. Учет материально-энергетических отходов в электроплазменных технологиях – также существенный элемент при определении эффективности их применения. Следует, однако, отметить, что понятие «отходы» применительно к ЭПТ может иметь и иной смысл, связанный с процедурами высокотемпературного обезвреживания широкого класса вредных и опасных веществ. Вопросы защиты от вышеуказанных вредных факторов, а также применения плазмотронов в природоохранных технологиях чрезвычайно важны для специалистов сфер экологии и обеспечения безопасной жизнедеятельности человека [48].

Устойчивая работа всей технологической схемы невозможна без соответствующего *воздействия на ее отдельные элементы*, обеспечивающего контроль и оптимизацию технологических и физических параметров процессов, а также *исправность используемого оборудования*. Такое воздействие должно осуществляться как в процессе работы (ручное или авто-

матическое управление), так и на стадии предварительного теоретического анализа и проектирования технологии.

Упомянутые критерии являются одними из функционально значимых признаков эффективности проектирования соответствующей электроплазменной технологии.

## **2.2. Основные принципы проектирования электроплазменного оборудования**

Как уже было отмечено, основным направлением использования генераторов низкотемпературной плазмы является разделительная резка металла, где они успешно конкурируют с другими известными методами – лазерной, газопламенной и водоабразивной разделкой [22]. Конкурентная борьба наблюдается и между производителями плазмотронов – как российскими, так и зарубежными. Данная ситуация может стать еще более напряженной в связи со вступлением России в ВТО, что потребует помимо участия в конкурентной борьбе с иностранными производителями еще и соблюдения международных норм и стандартов по безопасности и качеству продукции. В связи с этим перед отечественными разработчиками плазменной техники встают вопросы, связанные с четкой формулировкой критериев, на которые они должны ориентироваться в процессе проектирования оборудования, а перед потребителями – проблема поиска методик, позволяющих им сделать оптимальный, в соответствии с их потребностями и возможностями, выбор. Как правило, при проектировании новых устройств подобного типа конструкторы стремятся достигнуть максимальных значений тепловой и электрической мощности плазмотрона, кинетических характеристик плазменной дуги, надежности, долговечности, производительности при минимальных затратах и безопасности работы как отдельных узлов, так и всех элементов технологической схемы плазменной резки. Отметим в этой связи, что в многочисленных публикациях, где рассмотрены основы функционирования и конструирования плазмотронов и электроплазменных технологий, вопросы, касающиеся использования самых общих принципов и методов проектирования, к сожалению, практически не затронуты или излагаются применительно к конкретной конструкции или технологии. Все это заставило нас уделить особое внимание формулированию общих принципов, лежащих в основе проектирования плазменного оборудования.

Таким образом, задача проектирования плазмотронов должна решаться с учетом целого ряда принципов и факторов, которые можно классифицировать по трем основным группам (рис. 2.5).

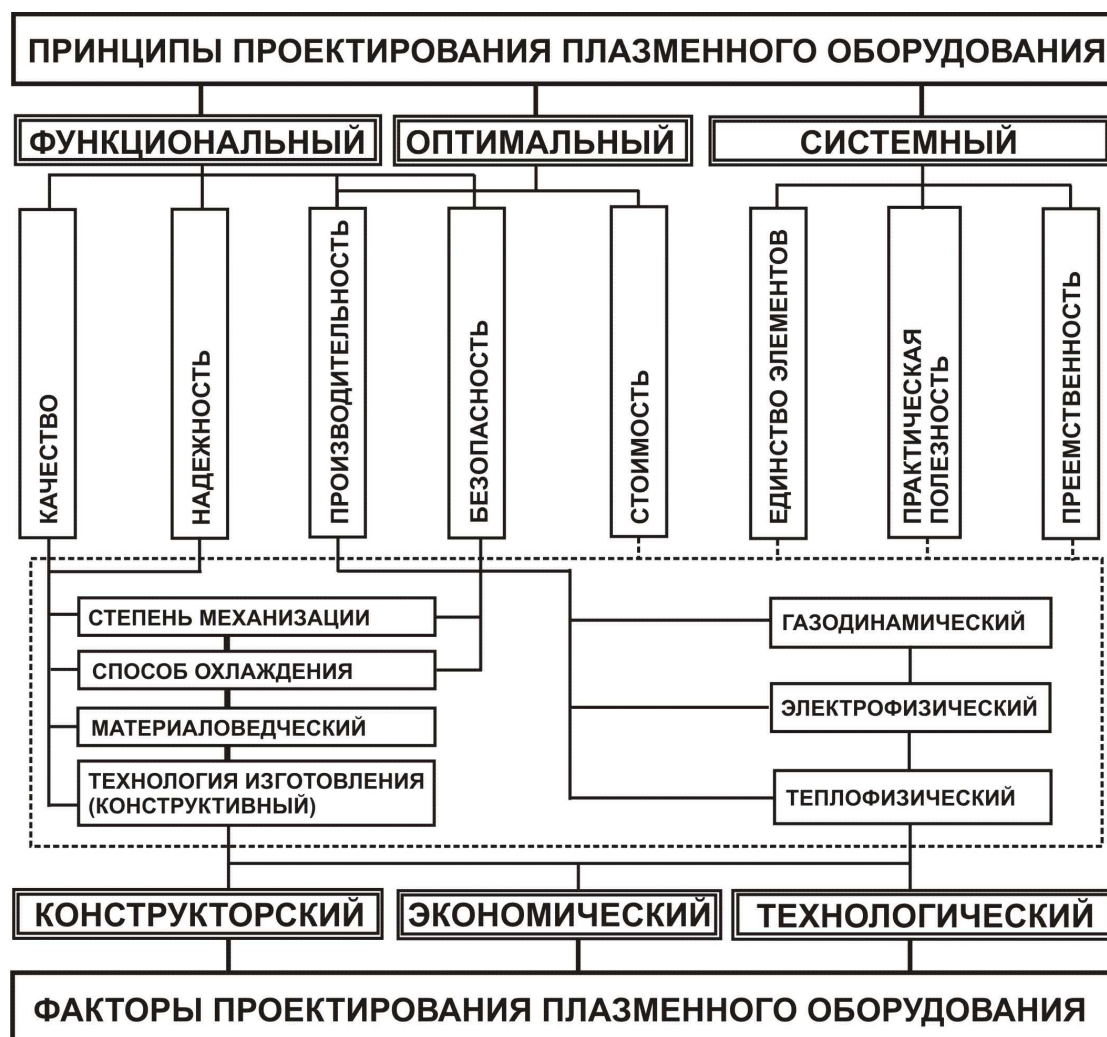


Рис. 2.5. Принципы проектирования в электроплазменных технологиях

Во-первых, это принцип функциональности, подразумевающий достижение в результате проектирования определенных показателей назначения объекта. Применительно к электроплазменным технологиям это означает ориентированность на характерные для большинства промышленных устройств показатели производительности, надежности и качества. Разумеется, конкретные параметры для каждой из технологий имеют свои признаки и значения. Например, в качестве интегральных показателей производительности для плазменной разделительной резки можно взять удельную производительность (т/чел. · мес), удельные энергозатраты (р./т или кВА/т), а также скорость резки металла при заданной толщине. Критерии надежности для плазмотрона долж-

ны, очевидно, подразумевать длительность безотказной работы его основных систем, из которых наименее стойкой является сопловой узел, имеющий ограниченный ресурс работы. Качество обработки при электроплазменном воздействии на материал, как правило, имеет широкую номенклатуру показателей, специфичных для конкретной технологии, и в большинстве случаев регламентируется соответствующими ГОСТами (критерии качества для плазменной разделки будут подробно рассмотрены ниже). В связи с тем, что применение плазменных технологий, как уже было отмечено, характеризуется целым набором опасных и вредных факторов, при разработке такого оборудования уже на стадии техзадания на проектирование необходимо закладывать регламентируемые ГОСТами и СНиПами параметры безопасного функционирования (нормы по акустическому, тепловому и электромагнитному излучению, выделению аэрозолей) и методы защиты от электрических, газовых, механических и других видов опасных воздействий. Не следует, разумеется, забывать и об эстетической привлекательности проектируемых изделий, простоте и удобстве их обслуживания и управления. Отметим также важность достижения наилучших функциональных показателей самого процесса проектирования электроплазменной техники. На практике это означает комплексное применение многочисленных методов проектирования, широкое внедрение алгоритмизированных процедур и автоматизированных средств, позволяющих получить оптимальные результаты за минимальное время.

Поскольку плазмотрон по своему конструктивному и технологическому исполнению является сложным многокомпонентным устройством, а функциональность его обеспечивается решением большого числа упомянутых выше задач, процесс его проектирования должен, очевидно, опираться на *системный* принцип, что подразумевает разработку не отдельных узлов плазмотрона, а всей конструкции, функционирующей в единстве ее отдельных элементов, и учет накопленного к данному моменту исторического опыта проектирования. Такой подход предполагает рассмотрение объекта как некоторой системы, характеризуемой следующими показателями [49]:

- элементным составом;
- структурой как формой взаимосвязи элементов;
- функциями элементов и целого;
- единством внутренней и внешней среды системы;
- законами развития системы и ее отдельных частей.

Фактически это означает, что проектирование плазменной технологии или самого плазмотрона необходимо вести, учитывая взаимодействие всех подсистем, обеспечивающих их функционирование.

Требование практической полезности подразумевает целесообразность, целенаправленность и обоснованность проектирования как всей системы, так и отдельных подсистем. Так, изменение профиля газовоздушного тракта плазмотрона должно быть сопряжено с газодинамическим, теплофизическим и энергетическим анализом, а также учитывать изменения параметров, характеризующих безопасность его применения. Изменение функциональных характеристик плазмотрона (скорости истечения и температуры струи, расхода ПОГ и т. д.) должно рассматриваться вместе с работой соответствующих технологических подсистем (источника питания, системы подачи ПОГ и охлаждения), а также учитывать влияние данных изменений на параметры надежности и качества, социально-экономические и экологические последствия. При этом как сам человек, так и окружающая его среда также должны рассматриваться в качестве объектов проектирования, что подразумевает анализ электроплазменных технологий с позиций экологической и производственной безопасности. Очевидно также, что в процессе проектирования необходимо опираться на принцип преемственности и учитывать наработки, которые были сделаны разработчиками оборудования ранее. В этой связи те достижения в сфере проектирования электроплазменного оборудования, которыми заслуженно гордятся ученые и инженеры России и бывших союзных республик, безусловно свидетельствуют о наличии солидной фундаментальной основы, способствующей дальнейшему развитию плазменных технологий. Преемственность подразумевает также и учет этапов жизненного цикла объекта, что, в свою очередь, тесно связано с параметрами надежности и эффективности его использования.

Ввиду того, что применение в процессе проектирования принципов функциональности и системности означает одновременное достижение значений большого числа параметров по целому ряду иногда взаимно противоречивых (конфликтных) критериев, важным принципом становится обеспечение оптимальных параметров проектирования (принцип оптимальности). Применительно к электроплазменным технологиям речь должна идти, очевидно, об оптимизации по критериям эффективности, стоимости и безопасности. Эффективность, понятая в широком смысле, подразу-

мекает достижение максимальных показателей производительности процесса с наименьшими материальными и социально-экономическими затратами. Для электроплазменных технологий это означает, что простой принцип улучшения энергетических показателей процесса (потребляемой мощности при высоком тепловом коэффициенте полезного действия (КПД), температуры плазменной среды, кинетической энергии струи и переносимых ею частиц) должен быть сопряжен с анализом обеспечения критериев надежности, качества и безопасности. Так, увеличение тока дуги имеет, как правило, своим следствием снижение ресурса сменных частей соплового узла, увеличение ширины реза и образующейся при этом зоны термического влияния, а также приводит к повышенному риску электропоражения и усилению воздействия на рабочий персонал шумовых, электромагнитных и ряда других вредных факторов. Кроме того, при этом, очевидно, возрастает и энергопотребление, – существенный фактор, сдерживающий в настоящее время широкое внедрение таких технологий. Возрастает также и расход плазмообразующих газов, требует особого внимания работа системы охлаждения, увеличиваются потери металла при резке и т. д. Следовательно, при проектировании плазмотрона или использующей его технологии следует находить оптимальные решения применительно к конкретному процессу или обрабатываемому материалу. При этом можно опираться на большое число разработанных к настоящему времени автоматизированных, экспериментальных и эвристических методов, некоторые из которых будут подробно рассмотрены ниже. Отметим также, что оптимизированным должен быть и сам процесс проектирования, что означает применение современных эффективных методов, позволяющих достигать запланированных результатов с минимальными стоимостными, машинными и человеческими затратами.

### **2.3. Методы проектирования электроплазменного оборудования**

Плазмотроны, как и технологии, в которых они применяются, – объекты конструирования, для которых цели, методы и процедуры проектирования имеют общие черты, свойственные большинству технических объектов. В силу этого большая часть признаков общей методологии инженерного проектирования (стадий проектирования, разработки конструкторской документации и т. п.) идентична и для проектирования в электро-

плазменных технологиях и может быть оставлена вне рамок данного пособия. При этом плазмотрон, рассматриваемый в совокупности с системами его обслуживания, – многофункциональное устройство, объединяющее в себе признаки преобразователя-генератора энергии, машины-орудия, устройства для материалобработки, системы управления и т. д., для которых приоритеты проектирования могут несколько различаться. По этой причине предметом дальнейшего описания станут только методы проектирования, имеющие специфическое воплощение для технологий плазменного воздействия на материалы. Разумеется, рассматривать эти методы следует с учетом сформулированных выше принципов проектирования: преемственности, системности, оптимальности и ряда других.

Первые разработки в сфере электроплазменных технологий появились, как известно, в конце 50-х – начале 60-х гг. XX в. и изначально велись по пути поиска конструктивных решений, веществ и материалов, обеспечивающих надежное функционирование плазмотронов, работающих в режиме высокой термической и электрической нагрузки. По этой причине появление, например, плазменных установок для воздушно-плазменной резки относится уже к концу 60-х – началу 70-х гг., когда были решены (в начальном приближении) проблемы термостойкости катодов. 1970-е и 1980-е гг. были посвящены накоплению экспериментального материала, позволившего разобраться с физической природой характерных для плазмотронов процессов (плазменная газодинамика, теплообмен в электродугowych камерах, приэлектродные процессы и т. д.). В ходе таких исследований были разработаны новые методики измерения энергетических, электрофизических и газодинамических параметров плазменных процессов. В результате появился целый спектр улучшенных по своим характеристикам плазмотронов, некоторые из которых с небольшими модификациями применяются и в настоящее время. Расширился также и спектр применения плазмотронов, включивший в себя технологии плазменной модификации материалов, плазмохимию, металлургические процессы. Нарастание экологических проблем к концу XX в. (в российском и в мировом масштабе) заставило разработчиков плазменного оборудования обратить внимание на плазменные нагреватели, что оказалось в русле общих тенденций перехода в стратегии управления отходами на высокотемпературные методы их обезвреживания и утилизации. Появились и новые сферы применения плазмотронов в научных целях, обусловленные необходимостью по-



лучения и изучения свойств как конденсированных веществ, так и микро- и наноструктур в условиях высокотемпературного воздействия, а также потребностями промышленности, заинтересованной в повышении эффективности работы двигателей, плазменных источников, реакторов и других высокоэнергетических устройств.

Таким образом, история развития электроплазменных технологий свидетельствует о глубоком внедрении принципов функционального и системного подходов в процедуры проектирования соответствующего оборудования. Однако требуется формулирование достигнутых к настоящему времени методических результатов, а также их уточнение с учетом современных потребностей.

Под **методом проектирования**, как известно, понимается прием или способ действия, позволяющий достичь необходимых показателей назначения разрабатываемого объекта. При этом выбор конкретного метода зависит как от специфики решаемой задачи, так и от особенностей самого проектировщика, а также имеющихся у него ресурсов. Как уже отмечалось выше, рассматриваемый в большом числе публикаций фактический материал, касающийся конструктивных и технологических особенностей плазменного оборудования, как правило, представляет собой описание разработки в виде готового к применению испытанного образца, но не описание процедур и методов самого проектирования. Фактически такая информация присутствует только в публикациях исследовательского типа, в которых интересующие нас вопросы формулируются обычно в частном и фрагментарном виде. Поэтому представленная на рис. 2.6 классификация методов проектирования электроплазменного оборудования опирается, в основном, на общие методы конструирования технологических объектов, но учитывает при этом и наш личный опыт, а также анализ упомянутого выше материала. Разумеется, при детальном рассмотрении отдельных методов можно придерживаться принципа преемственности (историзма). Однако, отметив очевидную тенденцию возрастания роли формализованных процедур в современных методах, обратим все же большее внимание на специфику каждого из представленных методов.

Все многообразие применяемых при проектировании методов можно разделить на три большие группы: эвристические, формализованные и экспериментальные [9, 10] (см. рис. 2.6).

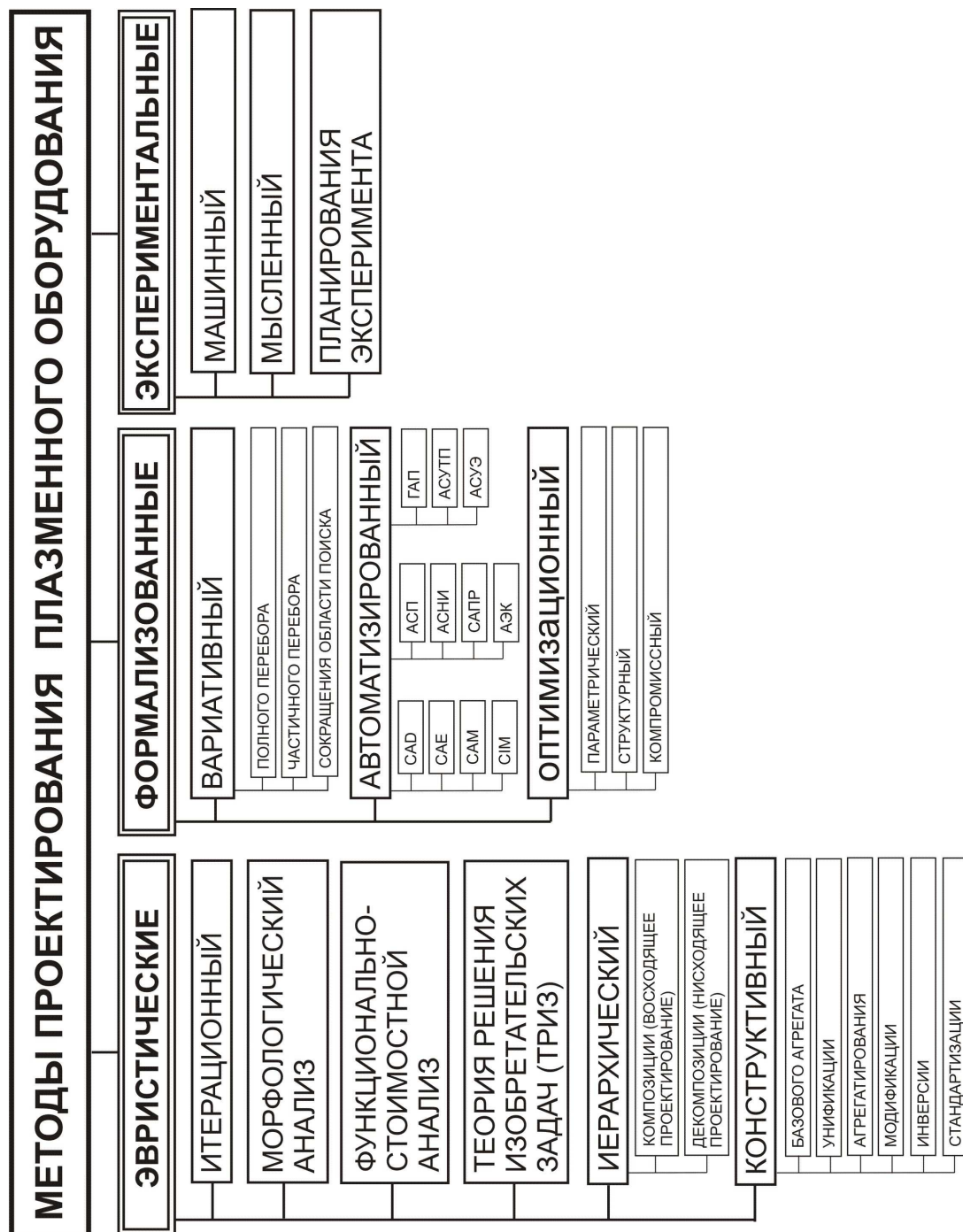


Рис. 2.6. Методы проектирования электроплазменных технологий и оборудования

Под *эвристическими*, как правило, подразумеваются приемы инженерного творчества, не поддающиеся процедуре формализации. В случае, когда объектом проектирования становится модель с конкретными параметрами и признаками, определяемыми назначением, востребованными оказываются процедуры алгоритмизации формализованных операций по поиску решений, удовлетворяющих упомянутому ранее критерию функциональности. Совокупность подобных процедур составляет основу *формализованных методов* проектирования. Неизбежной стадией разработки промышленного устройства является экспериментальная проверка эффективности проектирования, осуществляемая путем исследования различных характеристик устройства, представленного, как правило, в виде физического объекта (прототипа, опытно-промышленного образца).

*Экспериментальные методы* оказываются также необходимы и для установления взаимовлияния отдельных параметров устройства или технологии при отсутствии четкого понимания физических причин отдельных явлений, влияющих на функциональную эффективность объекта.

Разумеется, в общей процедуре проектирования в той или иной мере присутствуют почти все упомянутые методы, поскольку в настоящее время фактически отсутствуют алгоритмы, позволяющие свести этот процесс исключительно к автоматизированной разработке (без какого-либо участия человека на тех или иных стадиях). Часто результаты, достигнутые в ходе формализованного проектирования, дают толчок новым идеям и стимулируют развитие эвристических подходов. Тем не менее, как уже было отмечено, рост производительности электронно-вычислительных процедур, упрощение интерфейса программ автоматизированного проектирования и расширение спектра экспериментальных возможностей (появление, например, томографических исследования плазменной дуги [16]) постепенно снижают долю человеческого фактора в общих затратах на конструирование промышленных объектов и технологий.

### **2.3.1. Эвристические методы**

Если рассмотреть историю проектирования плазмотронов, можно увидеть, что применялся широкий спектр различных методов, среди которых, на наш взгляд, преобладали эвристические подходы, подразумевающие *итерационное* (постепенное) совершенствование отдельных узлов базовой

конструкции с их последующим *агрегатированием*. Очевидно, что одной из причин этого является разная степень автоматизации процедур в разные исторические периоды. Вторым фактором, способствующим постепенному улучшению конструкций плазмотронов, является накопление научного знания в специфичных для электроплазменных технологий областях: материаловедении, физике низкотемпературной плазмы, приэлектродных процессов, динамике струйных течений и т. д. Например, совершенствование плазморезательного оборудования напрямую связано с решением материаловедческих проблем эрозии катодов и сопел плазмотронов. Как известно, в СССР изучением плазменных процессов и технологий занялись после открытия в США в середине 1950-х гг. возможности сварки неплавящимися электродами, и уже в 1956–58 гг. во ВНИИавтогенмаше под руководством К. В. Васильева была осуществлена плазменная резка алюминия, меди, латуни и нержавеющей стали за счет сжатия дуги осевым потоком газа (аргона) [50]. В эти же годы были созданы надежные схемы формирования дуги, предложена тангенциальная подача ПОГ, разработаны специальные источники питания с крутопадающими внешними статическими характеристиками [51]. В 1960-е гг. были достигнуты успехи в решении таких задач, как повышение мощности сжатой дуги, надежности плазмотронов, поиск оптимального состава ПОГ. Для следующего периода (1970-е гг.) характерны разработка и совершенствование конструкций плазмотронов для воздушно-плазменной резки (в первую очередь, за счет применения катодов из циркония в ИЭС им. Е. О. Патона и гафния во ВНИИЭСО). Таким образом, новые разработки появлялись в процессе поиска удешевляющих процесс плазмообразующих сред (вместо инертных восстановительные, затем окислительные) и соответствующих им материаловедческих и конструктивных решений. Дальнейшее развитие конструкторских идей в этом направлении было связано с поиском способов увеличения мощности дуги и срока службы электродов и соплового узла за счет различных способов стабилизации катодного пятна (аксиальный и тангенциальный газовыхревой, магнитное вращение и т. д.) и термической изоляции стенок разрядной камеры (магнитное удержание дуги, распределенный вдув газа в сопло, фиксация длины дуги, использование межэлектродных вставок).

В ряду последних значительных достижений в этой области упомянем использование с 2002 г. электродов SilverPlus (Hypertherm, США) с се-

ребряным наконечником, что увеличило в 3 раза ресурс их работы, а также еще раз обратим внимание на внедрение в производство технологии точной, или сжатой, плазмы (2003 г. – HyPerformance компании Hypertherm, 2004 г. – HiFocus компании Kjellberg), обеспечивающей фокусировку дуги потоком вторичного газа с применением двухконтурного сопла. Некоторые из идей, примененных в данной технологии, были известны достаточно давно (патенты 1965 г. профессора Манфреда Вон Арденна на технологию узкой фокусировки FineFocus и изобретение в 1968 г. Диком Каучем (Dick Couch) и Бобом Дином (Bob Dean) способа сжатия дуги за счет радиального впрыска воды). Однако добиться реального прогресса в качестве резки и низкой себестоимости метра реза, ставящего данные технологии на передовые позиции по сравнению с другими высокоточными методами разделки, удалось лишь по истечении почти 40 лет путем последовательного улучшения отдельных элементов конструкции и решения сложных задач высокотемпературной теплофизики и газодинамики. На данных примерах мы видим реальную эффективность итерационных методов проектирования, достигаемую также и за счет применения идей, заложенных в принципах и методике *функционально-стоимостного анализа* (совершенствование его конструкции и технологии изготовления в направлении максимального снижения стоимости и удельных затрат).

Важным подспорьем в нахождении новых эвристических решений служит специально для этих целей разработанный метод *морфологического анализа*. В его основе лежит технология перебора возможных вариантов решений для отдельных частей задачи (так называемых морфологических признаков, характеризующих устройство) с последующим систематизированным получением их сочетаний. Применительно к процедуре проектирования плазмотронов это подразумевает комбинирование из известных конструктивных решений, найденных для основных его элементов: корпуса, сопла, узла крепления электрода, изолятора, систем водяного и газового обеспечения. Например, поиск оптимального по показателям шумового излучения профиля сопла можно проводить, используя зарекомендовавшие себя в акустике и аэродинамике решения: диф- и конфузорные формы с катеноидальным, экспоненциальным профилями или сопло Витошинского [52], а также сочетая их с серийно выпускаемыми катодами различных модификаций [53]. Серийно выпускаемые в настоящее время элементы сопряженного профилирования электродной камеры (по форме катода и соп-

ловой насадки) можно встретить в конструкции плазмотрона ТД-300, акустические характеристики которого требуют дополнительного исследования. Метод допускает определенную степень формализации путем использования так называемых морфологических карт, таблиц или ящиков, однако подразумевает все-таки большую роль интуитивных решений в процессе выделения отдельных узлов и их признаков, состава различных вариантов. Существенным подспорьем при нахождении эффективных средств преодоления возникающих в процессе проектирования противоречий могут послужить и алгоритмы известной *теории решения изобретательских задач*, позволяющие выявить и устранить причины, мешающие совершенствованию технической системы.

В методологии проектирования существует целая группа так называемых *иерархических* методов, применение которых в процедуре конструирования электроплазменного оборудования широко распространено и оказывается особенно оправданным. Как уже отмечалось ранее, плазмотрон, будучи сложным и многофункциональным устройством, может быть рассмотрен как иерархическая структура, состоящая из отдельных взаимосвязанных подсистем [36], которые, в свою очередь, также могут быть расчленены на части (см. рис. 2.2). Такой процесс расчленения системы называется декомпозицией, или нисходящим проектированием. В качестве систем могут выступать не только материальные объекты, но и процессы (см. рис. 2.3), явления и понятия (см. рис. 2.1, 2.5, 2.6) [35]. Графически такие взаимосвязи, как правило, изображают в виде блок-схемы, что позволяет в процессе выбора направления проектирования или поиска конструктивного решения выделить важный элемент общей структуры и сконцентрировать усилия на совершенствовании его функциональных возможностей, абстрагируясь от разработки других элементов структуры. Разумеется, последующие действия должны представлять собой процедуру сборки и увязывания отдельных подсистем в единую систему, т. е. осуществляться в соответствии с алгоритмами метода композиции. В процессе такой сборки обычно происходит проверка влияния отдельных подсистем на конструктивную совместимость, взаимную согласованность параметров, работоспособность системы в целом. Набор процедур, позволяющих произвести подобное согласование, обеспечивающее эффективное функционирование всей системы, называют восходящим проектированием. Таким образом, методы иерархического проектирования дают наилучший результат в про-

цессе совместного применения на основе сформулированных ранее функционального, системного и оптимального принципов.

В качестве иллюстрации метода нисходящего проектирования можно рассмотреть представленные на рис. 2.6, 2.7, 2.8 общие принципы конструирования плазмотронов для воздушно-плазменной резки. На рис. 2.7 представлены принципиальные схемы плазмотронов для ВПР [54], конструктивное различие которых обусловлено применением различных способов охлаждения при работе на разных мощностях потребления электроэнергии. Плазмотрон, изображенный на рис. 2.7, *а*, предназначен для машинной резки в диапазоне тока 50–300 А, запускается с помощью дежурной (вспомогательной) дуги и имеет водяное охлаждение. Плазмотроны, работающие при токе дуги до 160 А (рис. 2.7, *б*) имеют воздушное, а на повышенных токах (до 250 А) (рис. 2.7, *в*) – водовоздушное охлаждение.

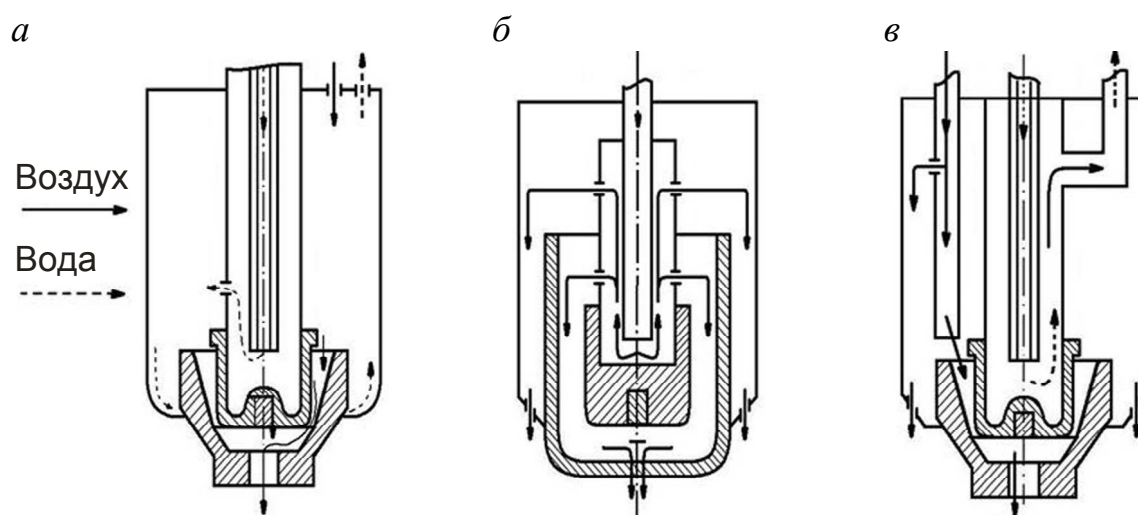


Рис. 2.7. Принципиальные конструктивные схемы плазмотронов для ВПР

На рис. 2.8 показана детализированная конструктивная схема плазмотрона для резки металлов [7]. Данная конструкция в основных своих чертах разработана еще в 1980-е гг. и имеет известные недостатки: невысокий (по сравнению с современными разработками) ресурс работы сопла и катода, что обусловлено пульсациями напряжения дуги, нестабильностью ее горения и процессами шунтирования [55], а также повышенное шумовое загрязнение [28, 46]. Причина подобных недостатков имеет, в основном, газодинамический характер, обусловленный, в свою очередь, конструктивными особенностями газовоздушного тракта плазмотрона (часто-

та шунтирования  $f = \Phi (G/d^3)$  [16], где  $G$  – массовый расход ПОГ,  $d$  – диаметр соплового канала). Об этом же говорят и результаты наших исследований, посвященных проблеме акустического излучения плазмотронов [28, 56, 57]. Следовательно, при рассмотрении большого числа структурных элементов такого плазмотрона целесообразно сосредоточиться на поиске оптимального профиля ГВТ плазмотрона, увязав его со входными параметрами ПОГ (давлением  $P$  и расходом  $G$ ) [58]. При этом среди отдельных частей всего ГВТ плазмотрона особый интерес представляет сопловой узел с завихрителем, конструкция которых, в основном, и определяет характеристики плазменной дуги (струи) (распределение скоростей газового потока, характер турбулентных пульсаций, динамический напор газа, частоты и уровень резонансных пиков в звуковой части спектра шумоизлучения и т. д. [59, 60]). Предложенные решения по профилированию ГВТ плазмотрона в сопловом узле [52, 53] должны быть, очевидно, в процессе последующей композиции увязаны конструктивно с другими элементами плазмотрона, а также исследованы на эффективность по другим критериям (теплофизическим [61], ресурсным и т. д.). В процессе восходящего проектирования может потребоваться корректировка конструктивных решений отдельных узлов (тракта охлаждения, профиля катода и т. д.), диапазонов допустимых параметров процесса, что обеспечит оптимальный по функциональным признакам результат разработки требуемого устройства.

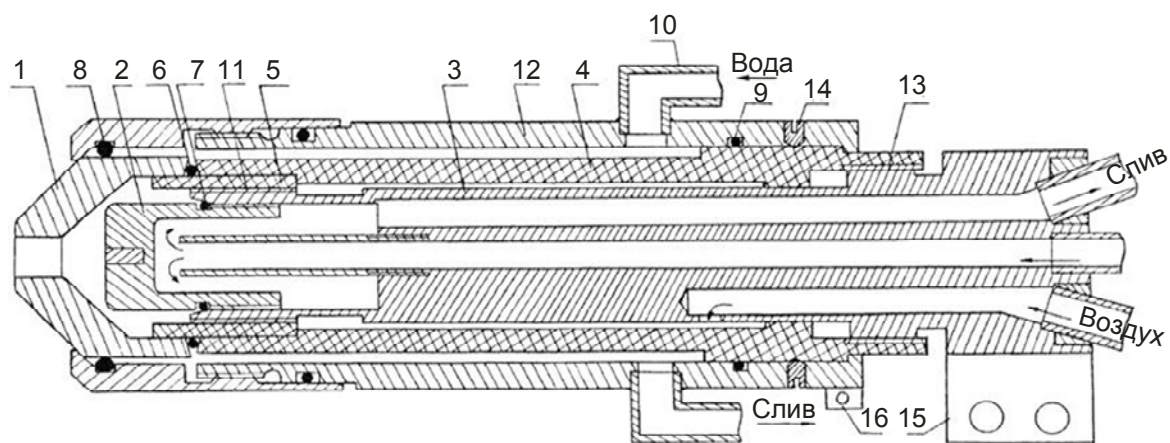


Рис. 2.8. Плазмотрон для воздушно-плазменной резки металлов:

1 – сопло; 2 – катод; 3 – катододержатель; 4 – изолятор; 5 – промежуточный изолятор; 6–9 – уплотнения; 10 – штуцер для подвода воды; 11 – закручивающий аппарат (завихритель); 12 – рубашка охлаждения; 13 – резьба; 14 – штифт; 15 и 16 – клеммы



Примером, иллюстрирующим результат проектирования на уровне отдельного элемента плазмотрона, являются конструкции его соплового (электродного) узла. Как отмечают И. Г. Ширшов и В. Н. Котиков, основные эксплуатационные характеристики плазмотрона определяются конструкцией и материалом трех основных элементов: электрода (при прямой полярности – катода), сопла и изолятора [34]. При этом максимальная эффективность и качество достигаются лишь в том случае, когда конструктивные и технологические параметры перечисленных элементов, специфичные для каждой конструкции плазмотрона, взаимосвязаны и образуют систему, называемую дуговой камерой [34] (рис. 2.9). К конструктивным параметрам относятся следующие: высота канала сопла  $H_c$ , радиус сопряжения канала  $R_c$ , расстояние от среза до рабочей поверхности электрода  $H_{эс}$ , радиус электрода  $R_э$ , угол раскрытия  $\alpha$ , диаметр канала сопла  $D_c$ , расстояние от рабочей поверхности электрода до завихрителя  $h$ . Стабильная работа плазмотрона обеспечивается при неизменных параметрах  $H_{эс}$ ,  $D_c$  и  $H_c$ .

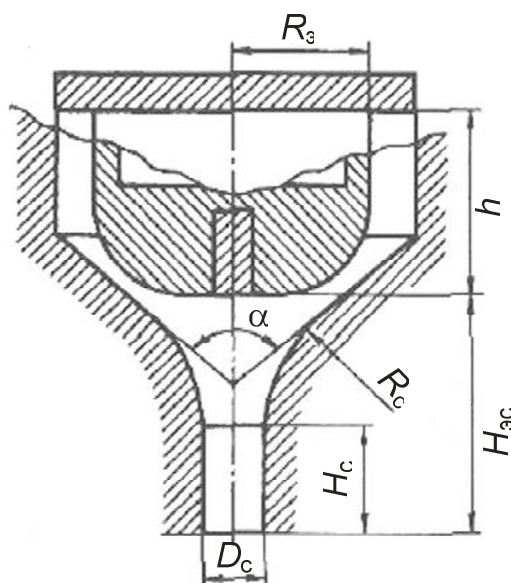


Рис. 2.9. Конструктивные параметры дуговой камеры плазмотрона

Технологические и конструктивные параметры находятся в определенной взаимосвязи. Например, ток дуги – определяющий фактор лишь в совокупности с диаметром сопла, из-за чего увеличение или уменьшение скорости резки при заданных токе дуги и толщине разрезаемого металла может происходить за счет уменьшения или увеличения диаметра сопла при соответствующем уменьшении или увеличении ширины реза.

Диапазоны оптимальных значений конструктивных параметров, обеспечивающих максимальные режущие свойства плазмотронов, для ВПР представлены на рис. 2.10 [54]:  $r_c = (0,9-2,2)d_c$ ,  $r_э = (0,9-1,2)d_c$ ,  $d_э = (4-5)d_c$ ,  $\delta = (0,2-0,4)d_c$ ,  $h_{kc} = (3,5-4,5)d_c$ ,  $l_c = (1,5-2,0)d_c$ .

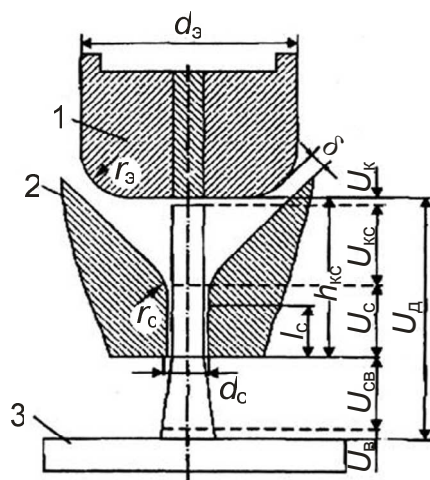


Рис. 2.10. Параметры воздушно-плазменной дуги в сопловом узле режущего плазмотрона:

1 – катод; 2 – сопло; 3 – анод;  $U_i$  – падение напряжения на отдельных участках дуги

Как уже было отмечено, основным размерным параметром разрядной камеры плазмотрона является диаметр сопла, выбираемый по оптимальной плотности тока  $j_c$  в сопловом канале (по данным эксперимента  $j_c = 40-70 \text{ А/мм}^2$  для тока  $I < 150 \text{ А}$  в плазмотронах с воздушным охлаждением). Следует отметить, что более детальное рассмотрение взаимосвязи конструктивных и технологических параметров [7] требует также учета газодинамических параметров потока ПОГ в сопловом узле (массового расхода  $G$  и давления  $P$ ). Так, значение критического тока (выше которого начинается интенсивное разрушение катода)  $I_{кр} = f(G, P, d)$ , а в качестве условий длительного ресурса работы катода в воздушной среде можно использовать соотношение

$$\frac{G}{Pd} \geq 2 \cdot 10^{-6};$$

$$I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{G}{P}}.$$

Очевидно, что определение эффективности проектирования электродных узлов требует дополнительного расчета или оценки значений газодинамических параметров потока ПОГ, существенно зависящих, в свою очередь, от профиля всего газоздушного тракта плазмотрона [28, 56, 59, 60].

Существенную часть методов, широко применяемых при проектировании в электроплазменных технологиях, можно отнести к так называемым *конструктивным* методам, в основе которых лежат способы, как правило, постепенного улучшения уже работающей конструкции, что на практике составляет до 90 % объема задач проектирования. Фактически это те же эвристические методы (итерационные, иерархические и т. д.), но осуществляемые без ограничения на поиск исключительно новых, «прорывных» решений. К конструктивным обычно относят методы, основанные на модификации, унификации, стандартизации, агрегатировании, инверсии и т. д. Как правило, в процессе такого проектирования осуществляется совершенствование (модификация) конструкции за счет замены ее отдельных деталей или узлов на более современные и функционально эффективные. Так, упомянутое выше совершенствование катодов плазмотронов позволило расширить диапазон их применимости и удешевить саму технологию. На практике, как правило, обращают внимание на самые уязвимые части конструкции (у плазмотрона – электроды и сопловой узел), совершенствуя их работу или делая процедуру их замены простой, удобной и недорогой. Например, к настоящему времени промышленностью разработана и предлагается целая серия катодов различной модификации для работы на разных токах, с разными системами охлаждения и плазмообразующими средами. Элементы крепления таких сопел, а также других часто заменяемых узлов плазмотрона унифицированы, что позволяет легко производить их замену, сборку и разборку. Несмотря на то, что сам плазмотрон – как правило, оригинальное устройство со своим, не подлежащим стороннему анализу, «ноу-хау» (неразборность отдельных узлов), при его внедрении в соответствующую электроплазменную технологию широко используется метод стандартизации, подразумевающий использование стандартных деталей и узлов, элементов со стандартными параметрами. Такими элементами общей технологической схемы могут быть источник питания, системы подачи плазмообразующих и охлаждающих сред, подводящие коммуникации, системы управления и перемещения, средства обеспечения безопасности процесса. Несмотря на конструктивную сложность таких элементов по отдельности, их внедрение в технологию позволяет упростить процедуру проектирования за счет использования типовой документации, а также удешевить процесс эксплуатации за счет применения типовых технологических операций и оборудования, ускорения обслуживания и ремонта.

Следует заметить, что применимость методов унификации и стандартизации во многом регламентируется стандартами на соответствующее оборудование и технологии. Применительно к сварочным и родственным им процессам (и плазменно-дуговым технологиям резки, в частности) такую роль выполняют, например, межгосударственные (ГОСТ 10796–74 «Резаки ручные воздушно-дуговые. Типы и основные параметры», ГОСТ 12221–79 «Аппаратура для плазменно-дуговой резки металлов. Типы и основные параметры», ГОСТ 26090–91 «Материалы, используемые в оборудовании для газовой резки, сварки и аналогичных процессов. Общие требования») и международные (ISO 5175:1987 «Equipment used in gas welding – Cutting and allied processes – Safety devices for fuel gases and oxygen or composed air – General specifications, requirements and tests», ISO 9013:2002 «Thermal cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical product specification and quality tolerances. Ed.2», ISO 17652–3:2003 «Welding – Test for shop primers in relation to welding and allied processes – Part 3: Thermal cutting» и т. д.) стандарты.

Иллюстрацией применения конструктивных методов в проектировании плазмотронов может служить разработка термохимических катодов для ВПР плазмотронов с повышенным ресурсом работы [62]. В качестве примера таких катодов назовем применяемый в плазмотроне РПТ-1 (разработка ИТФ СО РАН и НГУ) полый электрод с расположенными по окружности внутренней поверхности гафниевыми вставками, которые включаются в работу по мере повышения силы тока дуги, что способствует увеличению ресурса работы электрода и плазмотрона в целом. В качестве аналога В. Л. Дзюба и К. А. Корсунов упоминают свою конструкцию катода, содержащую медный полый водоохлаждаемый катододержатель 1 с пятью термохимическими (гафниевыми или циркониевыми) вставками 2 и 3 диаметром 3 мм, с ресурсом работы от 10 до 50 часов при токе дуги 500 А (рис. 2.11, а) [63]. Еще один вариант конструкции высокоресурсного катода представлен на рис. 2.11, б: электродный узел, содержащий медный полый электрод 1, запрессован в медный водоохлаждаемый корпус 2, что предотвращает снижение локального перегрева поверхности разрядного канала; увеличение ресурса работы электрода (при токе до 700 А) происходит за счет расширения резьбовой нарезки разрядного канала электрода, вызывающего принудительное расщепление опорных пятен дуги. В представленном на рис. 2.11, в электроде, состоящем из двух частей 1 и 2, разделенных между собой изолятором 3, также происходит расщепление

опорного пятна дуги на две части с увеличением ресурс его работы. Очевидно, что подобные конструкции узлов, спроектированные по критериям надежности, требуют дополнительного анализа и оптимизации в соответствии с критериями качества и безопасности работы.

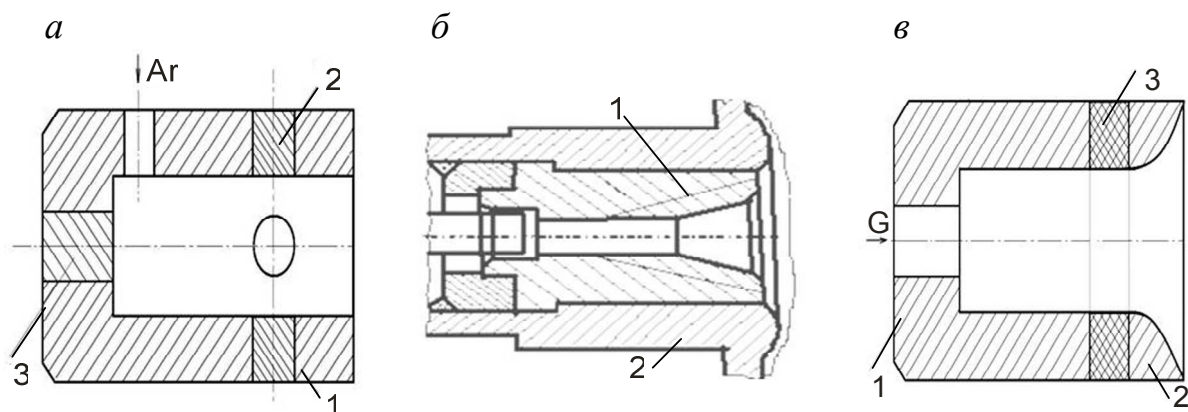


Рис. 2.11. Высокоресурсные электроды плазмотронов для ВПР

Внедрение плазмотрона в электроплазменную технологию основывается, как правило, на применении метода базового агрегата, под которым подразумевается наиболее сложная часть будущих изделий (в нашем случае – плазменный генератор). При разработке базового агрегата стремятся спроектировать его таким образом, чтобы на его основе за счет использования унифицированных соединительных элементов и согласованных параметров отдельных подсистем можно было создать большое количество новых изделий (систем) с различными характеристиками и функциями. Применительно к плазмотрону это обычно означает унификацию крепежных элементов с возможностью присоединения различных по функциональному назначению сопел, катодов, обслуживающих систем. При этом конструктивно различные узлы плазмотрона должны быть спроектированы с учетом работы в широком диапазоне технологических режимов и иметь возможность эффективно функционировать с разными внешними и внутренними технологическими подсистемами. Произвольность сочетания отдельных унифицированных агрегатов, лежащая в основе метода агрегатирования, в электроплазменных процессах используется нечасто ввиду специфической значимости каждого элемента общей технологии. Как правило, данный метод применим в ситуациях масштабного внедрения электроплазменных установок или одновременного использования нескольких плазмотронов в одной технологии.

В ряду известных методов конструктивного проектирования упомянут также метод инверсии – создания новой конструкции путем изменения функций, форм или положения частей существующего изделия на фактически противоположные. Например, переход при проектировании от диффузорной формы сопла электродугового металлорежущего плазмотрона к конфузорному расширению [64] позволяет использовать такой плазмотрон в качестве нагревателя дисперсных и газовых сред за счет изменения скоростей и времени нагрева. Помимо нагрева такой плазмотрон уже может выполнять функции металлургического и плазмохимического реактора и использоваться в технологиях получения высокочистых и обогащенных материалов, а также при обезвреживании и утилизации отходов. Параллельно решается и проблема шумового загрязнения в ультразвуковой области за счет снижения скоростей истечения плазменной струи.

Другим примером применения метода инверсии служит разработка запатентованных конструкций электродных узлов плазменной горелки, в которых за счет изменения степени конфузорности также меняются параметры назначения плазмотронов – с резательного на сварочный (рис. 2.12) [65]. Важным достоинством патента является его сравнительная часть, в которой обращается внимание на техническое противоречие, присущее проектированию плазменных горелок с рекуперацией тепловых потоков: любое альтернативное действие, направленное на повышение эффективности, сопровождается ростом теплового потока в стенку канала сопловой насадки. Например, для резки металлов необходимо повышать степень сжатия электрической дуги, увеличивать длину и газодинамический напор плазменной струи путем повышения давления в разрядной камере и/или уменьшения выходного отверстия центрального канала сопловой насадки. При этом не только увеличивается тепловой КПД плазмотрона, определяемый в основном конвективным теплообменом и степенью турбулентности потока рабочего газа, но и возрастают тепловой поток в стенку канала и температура его стенки, снижая стабилизирующее действие вихревого потока. Для сварочного плазмотрона требуется увеличение длины плазменной струи с одновременным уменьшением ее газодинамического напора путем увеличения выходного отверстия центрального канала сопловой насадки до размера большего, чем минимальный размер, исключаящий ее тепловое заклинивание, и меньшего, чем размер, при котором происходит обрыв косвенной дуги. В результате снижения газодинамического напора плазменной струи

и степени турбулентности потока ПОГ ухудшается тепломассообмен и уменьшается стабилизирующее действие вихревого потока рабочего газа, за счет чего растет тепловой поток в стенку канала сопловой насадки.

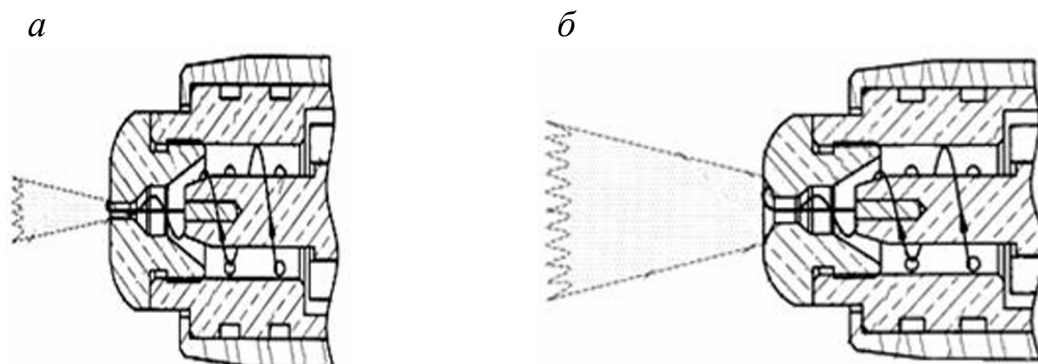


Рис. 2.12. Конструкция плазмотрона с переменной конфузурностью электродной камеры:

*a* – плазмотрон для резки; *б* – плазмотрон для сварки

Указанную проблему авторы патента В. С. Тверской и А. В. Тверской решают за счет конфузорного сопряжения разрядной камеры с конусной поверхностью катода, внутренней поверхностью завихрителя и выходным отверстием центрального канала сопловой насадки. В работе приводятся оптимальные соотношения конструктивных параметров, среди которых следующие:  $D_w$  – диаметр вихревой камеры,  $d_w$  – диаметр каналов завихрителя,  $i$  – число каналов завихрителя,  $\eta$  – угол между направлением осей каналов завихрителя и центрального канала сопловой насадки,  $D_e$  – диаметр выходного отверстия центрального канала сопловой насадки,  $D_a$  – диаметр разрядной камеры,  $D_c$  – внешний диаметр стержневого электрода в вихревой камере,  $d_c$  – диаметр торца стержневого электрода,  $H_w$  – длина вихревой камеры,  $H_a$  – длина разрядной камеры,  $H_e$  – длина выходного отверстия центрального канала насадки. Очевидно, что использование большого числа параметров затрудняет оптимизацию таких конструкций, а для эффективного решения рассмотренной в патенте проблемы проектирования необходим учет газодинамических характеристик ПОГ в зависимости от профиля ГВТ плазмотрона. Дополнительно необходимо при проектировании учитывать и акустические критерии безопасности, которые также связаны с газодинамикой потока ПОГ и профилем соплового узла плазмотрона [28, 52, 53, 58].

### 2.3.2. Формализованные методы

Тенденцией последнего времени является возрастание роли формализованных методов проектирования, что снижает влияние человеческого фактора на полученный результат. Расширяется и область их применения, в том числе в проектировании в сфере электроплазменных технологий. Для использования формализованных процедур при проектировании технического устройства необходимо знание основных закономерностей, определяющих достижение требуемой величины параметра назначения и возможность моделирования соответствующих объектов, процессов и явлений. В этом случае становится возможным алгоритмизировать процедуры проектирования на основе схем, функциональных и параметрических зависимостей, формально-логических отношений и т. д. для их последующего использования в системе «человек – машина».

Формализация управления процессом проектирования электроплазменных технологий и оборудования осуществляется на основе моделей знаний четырех видов [66] (рис. 2.13).

Первый вид – это информационно-справочные модели, в которых обобщены опыт и знания проектировщика по разнообразным техническим дисциплинам, относящимся к предметной среде проектирования. Такого рода обобщения в свою очередь представляют собой базу данных, сформированную из моделей более низкого уровня, опирающихся на конкретные объекты, процедуры и явления, учитываемые в процессе проектирования. На рис. 2.14 представлена структурная схема информационно-справочных моделей, построенных с учетом структурно-функциональных, факторных, процедурных моделей и моделей физико-химических процессов, характерных для электроплазменных технологий.

Конкретные примеры информационно-справочных моделей более низкого уровня – классификация плазмотронов и их элементов (см. рис. 1.1) и известные классификации К. В. Васильева (1974 г.) [29] и В. А. Малаховского (1988 г.) [51] (приложение). Очевидно, что классификации К. В. Васильева и В. А. Малаховского могут быть дополнены (речь идет об упомянутом выше методе двухконтурной стабилизации дуги (точной, или сжатой, плазмы) и технологии повышения ресурса катодов SilverPlus).



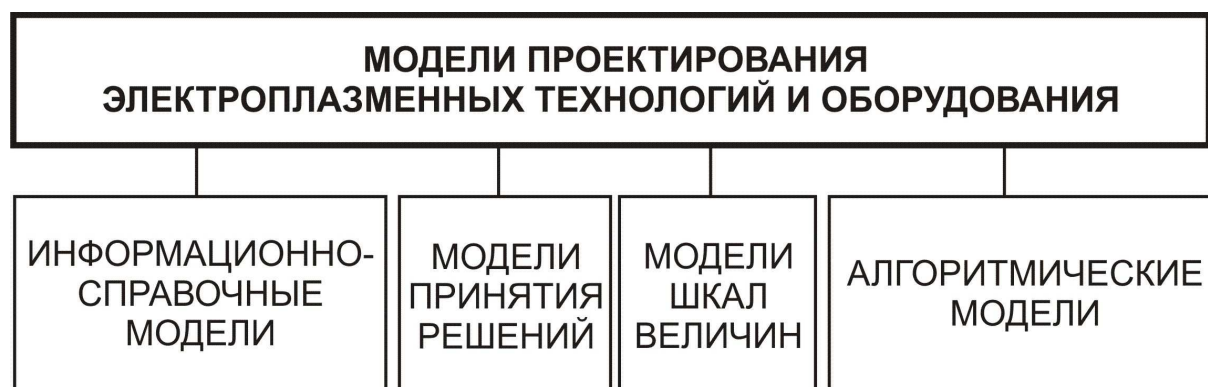


Рис. 2.13. Структурная схема моделей проектирования электроплазменных технологий

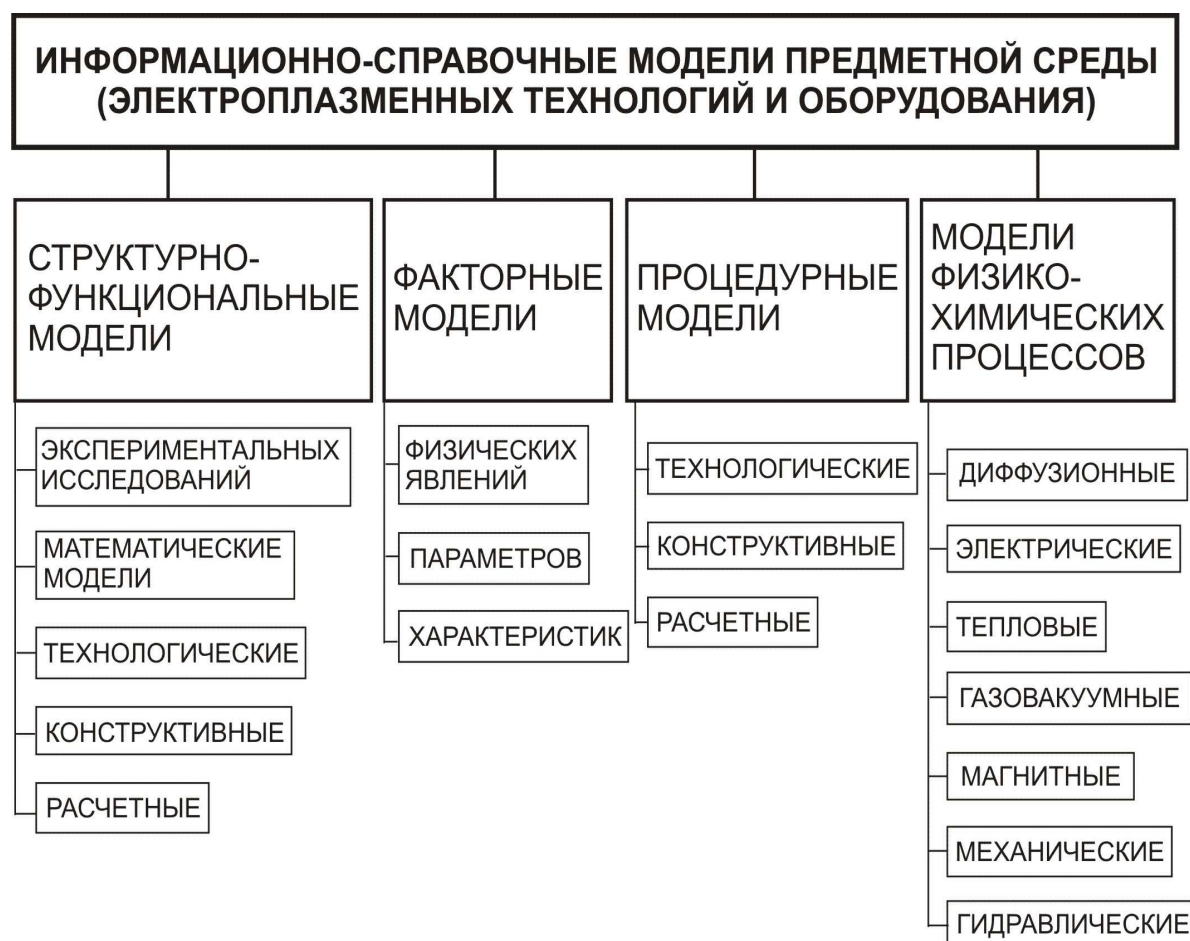


Рис. 2.14. Структурная схема информационно-справочных моделей для формирования проектных моделей

Для алгоритмизации процедуры проектирования формируются процедурные модели последовательности решения проектных задач. В состав процедурной модели, в свою очередь, входят модели двух типов: объектно-ориентированные проектные модели знаний и модели принятия решений. Первые формируются на основе информационно-справочных моделей в виде специальных информационных единиц и предназначены для решения отдельных этапов проектной задачи в соответствии с последовательностью, задаваемой алгоритмом. Модели принятия решений позволяют формализовать рассуждения проектировщика о целях, критериях, методах, возможностях, достоверности, адекватности решаемой задачи и представляют собой, как правило, процедуру многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности (рационализации). Фактически, на данном этапе в общую алгоритмизированную процедуру управления проектированием вносится фактор субъективности личности проектировщика, что обусловлено отсутствием четких и неконфликтных критериев выбора наилучшего результата.

Результаты формализованных процедур сильно зависят от точности и количества характерных для каждой модели входных данных; также следует учитывать субъективные и объективные факторы, влияющие на измерительный процесс. Для сравнения разнообразных параметров, выраженных в различных физических единицах, С. М. Лисовский предлагает использовать некоторые универсальные измерительные системы в виде шкал (функцию принадлежности, степень соответствия, вероятностную, процентную или вербальную шкалу) – так называемые модели шкал величин [66].

Следует отметить неоднозначность процесса выделения аспектов описания, на базе которых формируются различные проектные модели. Возможны и другие варианты их структуризации и дифференциации, однако очевидной является необходимость выделения функционального, конструкторского, алгоритмического и технологического аспектов проектирования систем [49].

Модели поиска решений функционируют на основе применения группы формализованных *вариативных* методов. Основой таких методов является аналитический или численный поиск конкретных вариантов для различных допустимых сочетаний параметров. При этом, как правило, большее число вариантов позволяет получить лучшее окончательное решение. Идеальным для такого случая является метод полного перебора

всех известных в данной ситуации вариантов. Однако в реальных условиях ограниченности ресурсов, как правило, пользуются методами (алгоритмами) упрощенного поиска – частичного (выборочного) перебора и сокращения области поиска. В первом случае используют детерминированные методы, позволяющие выбрать параметры согласно некоторого закона, и методы случайного поиска. Для решения таких поисковых задач используют, как правило, математические методы теории вероятности и корреляционного анализа. Возможность анализа дополнительной информации, получаемой при расчете предыдущих вариантов, позволяет реализовать методика сокращения области поиска. В качестве иллюстрации применения таких методов к проектированию электроплазменных технологий можно упомянуть процедуру определения критериальных параметрических соотношений, заключающуюся в выборе существенно важных конструктивных и технологических параметров с последующим установлением между ними функциональных отношений. Например, для оценки эффективности работы плазмотронов линейной схемы можно опереться на известные обобщенные уравнения [6, 7, 15, 16]:

$$U = A \left( \frac{I^2}{Gd} \right)^\alpha \left( \frac{G}{d} \right)^\beta (Pd)^\gamma \text{ (для вольт-амперной характеристики (ВАХ))} \quad (2.1)$$

и

$$\frac{1-\eta}{\eta} = K \left( \frac{I^2}{Gd} \right)^m \left( \frac{G}{d} \right)^n (Pd)^q \left( \frac{l}{d} \right)^\phi \text{ (для КПД),} \quad (2.2)$$

где  $U$  – напряжение дуги;  
 $I$  – ток дуги;  
 $G$  – суммарный расход газа;  
 $d$  – диаметр электродуговой камеры;  
 $P$  – давление в конце камеры;  
 $l$  – длина электродуговой камеры;  
 $\eta$  – тепловой КПД;  
 $A, K, \alpha, \beta, \gamma, m, n, q, \phi$  – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных особенностей плазмотрона и технологии его применения.

Достоинством данного подхода является возможность быстрого и упрощенного анализа конкретной конструкции плазмотрона, работающей по заданной технологии. Однако данный метод был разработан еще в 1970–80-е гг. в СО АН СССР и имеет, на наш взгляд, ограниченное применение, что обусловлено как расширением номенклатуры конструкций плазмотронов, так и неопределенностью ряда конструктивно зависимых газодинамических критериев (например, давления в сопловом узле). Отметим также, что в последние годы стал наблюдаться существенный крен в направлении использования методов машинного моделирования с применением автоматизированных программных комплексов, значительно облегчивших расчеты, но зачастую дающих результаты с невысокой степенью системности.

Как отмечает С. М. Лисовский, наиболее радикальным средством модернизации процедур проектирования является внедрение *автоматизированных* методов интегрированных информационных технологий на базе использования современных вычислительных средств и сетевых решений. К таким технологиям следует отнести системы автоматизированного проектирования (САПР), инженерного анализа, технологической подготовки и производства (системы CAD/CAM/CAE), а также управления производственной информацией (PDM) (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Блок-схема системы автоматизированного проектирования

Степень применимости той или иной автоматизированной системы зависит от того, на какой стадии общей процедуры проектирования планируется ее внедрение. Как правило, использование компьютеров на стадии

синтеза (первичных операции проектирования, необходимых для формирования концептуального проекта) невелико из-за их низкой способности к обработке качественной информации. Тем не менее, роль компьютеров может оказаться значимой уже в процессе формирования информационно-справочных моделей при обработке больших массивов баз данных и каталогов. Полезным оказывается и использование компьютерных средств на стадии концептуализации проекта за счет применения систем геометрического моделирования на базе программных средств автоматизированной разработки чертежей – САД-систем. В электроплазменных технологиях, как правило, применяют машиностроительные САПР, предназначенные для разработки деталей и механизмов на основе параметрического проектирования их конструктивных элементов, технологий поверхностного и объемного моделирования (КОМПАС, SolidWorks, CATIA, AutodeskInventor и т. д.).

Основную роль машинные средства играют, как правило, на аналитической стадии проектирования, когда на базе концептуальной формируется аналитическая модель. Поскольку в такой процедуре неизбежны исключение малозначимых деталей и элементов, а также редукция размерностей концептуальной модели, многое в конечном результате формирования такой модели зависит от типа анализа и необходимой точности решения. Например, при анализе эффективности проектирования плазмотронов часто пользуются приведенными выше критериальными соотношениями (2.1), (2.2), которые, в свою очередь, имеют различные числовые коэффициенты в зависимости от используемой аналитической модели плазмотрона. Среди таких моделей широкое распространение имеют модели плазмотронов линейной схемы, основанные на фиксации длины дуги (с самоустанавливающейся и с фиксированной длиной), а также на рассмотрении их сопловых узлов в виде камерных систем (одно- и двухкамерных) [16] (рис. 2.16). Очевидно, что подобные модели действительно позволяют классифицировать и упрощают анализ широкого многообразия плазмотронов, однако не дают возможности учесть те небольшие преимущества, которые могут быть достигнуты разработчиками благодаря применению конструктивных методов улучшения отдельных элементов базовой конструкции. Приводимые в литературе [6, 7, 16] значения числовых коэффициентов в аппроксимирующих формулах получены на основе обработки больших массивов экспериментальных данных, имеющихся для плазмотронов различного

конструктивного исполнения, и могут, очевидно, применяться в качестве интегрированной информационно-справочной модели эффективности проектирования в электроплазменных технологиях.

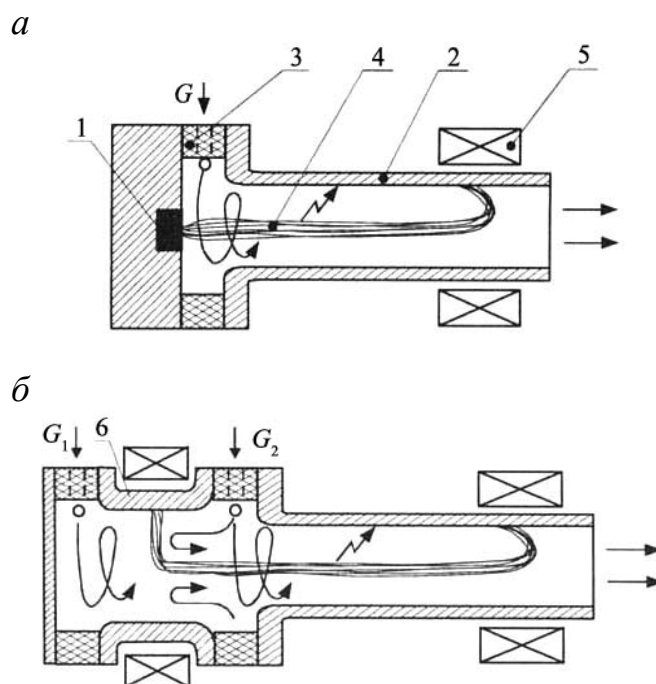


Рис. 2.16. Схемы плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги:  
*а* – однокамерный с торцевым термокатодом: 1 – термокатод; 2 – выходной трубчатый электрод; 3 – кольцо закрутки; 4 – дуга; 5 – соленоид;  $G$  – расход газа, подаваемого в камеру; *б* – двухкамерный с трубчатым внутренним электродом; 6 – трубчатый внутренний электрод;  $G_1$ ,  $G_2$  – расход газа, подаваемого в камеру

Сформированная аналитическая модель, как правило, подвергается параметрическому и геометрическому анализу с использованием программных средств системы автоматизированного расчета и конструирования CAE (computer-aided engineering) – технологии, предназначенной для анализа результатов геометрического (CAD) проектирования путем моделирования и исследования различных свойств разработанной модели. Конечной целью такого анализа является усовершенствование и оптимизация конструкции по установленным на начальном этапе проектирования критериям. В настоящее время разработано и используется большое количество программных средств CAE, среди которых применительно к процедурам проектирования электроплазменного оборудования можно упомянуть системы полнофункционального инженерного анализа, обладающие мощными средствами (в том числе моделирования геометрии), большими хра-

нищами типов для сеток конечных элементов, а также всевозможных физических процессов (наиболее известны системы ANSYS/Multyphysics, T-FLEX, AI\*NASTRAN и MSC.NASTRAN). Как правило, в таких пакетах отсутствует ассоциативная связь с CAD-системами, что вынуждает разработчика итерационно изменять геометрию устройства с последующим ее новым вводом в программу и корректировкой расчетных данных. Менее мощными средствами анализа обладают системы, встроенные в САПР, но их достоинством является возможность учета изменения геометрии модели. К таким пакетам можно отнести, к примеру, Catia CAE для CATIA или Pro/MECHANICA для Pro/ENGINEER. Есть также CAE-системы среднего уровня, не имеющие мощных расчетных возможностей (например, встроенный в собственную CAD-систему COSMOS/FloWorks для SolidWorks или считывающий геометрию из CAD пакет visualNastran). Как правило, в этих пакетах используется метод конечных элементов FEM (finite-element method): для анализа характерных для электроплазменных технологий процессов тепло- и массообмена, расчета параметров потоков одно- и мультифазового состава и решения других задач механики сплошных сред. Для формирования подходящей для такого метода аналитической модели пакеты оснащаются препроцессорами, а для визуализации полученных в процессе анализа результатов – постпроцессорами.

Можно привести большое количество примеров использования программных средств в процессе численного анализа конкретных конструкций плазмотронов и условий их применения. Отдельно отметим разработанную в школе С. В. Дресвина (СПбГПУ<sup>1</sup>) методику математического моделирования плазмотронов, позволяющую рассчитывать температуры и скорости плазмы в сопловом канале плазмотрона с применением программного пакета MathCAD (блок-схема вычислений представлена на рис. 2.17) [12, 13]. Алгоритм расчета опирается на использование уравнений баланса энергии и движения плазмы и позволяет итерационно, применяя метод контрольного объема, вычислять параметры плазменного потока в двумерном приближении. Достоинством метода является возможность учета температурной зависимости газо- и термодинамических параметров, однако степень формализации процедуры во многом зависит от объема заранее сформированных баз температурнозависимых параметров, значения которых не всегда легко определяемы по известным справочным данным.

---

<sup>1</sup> СПбГПУ – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.



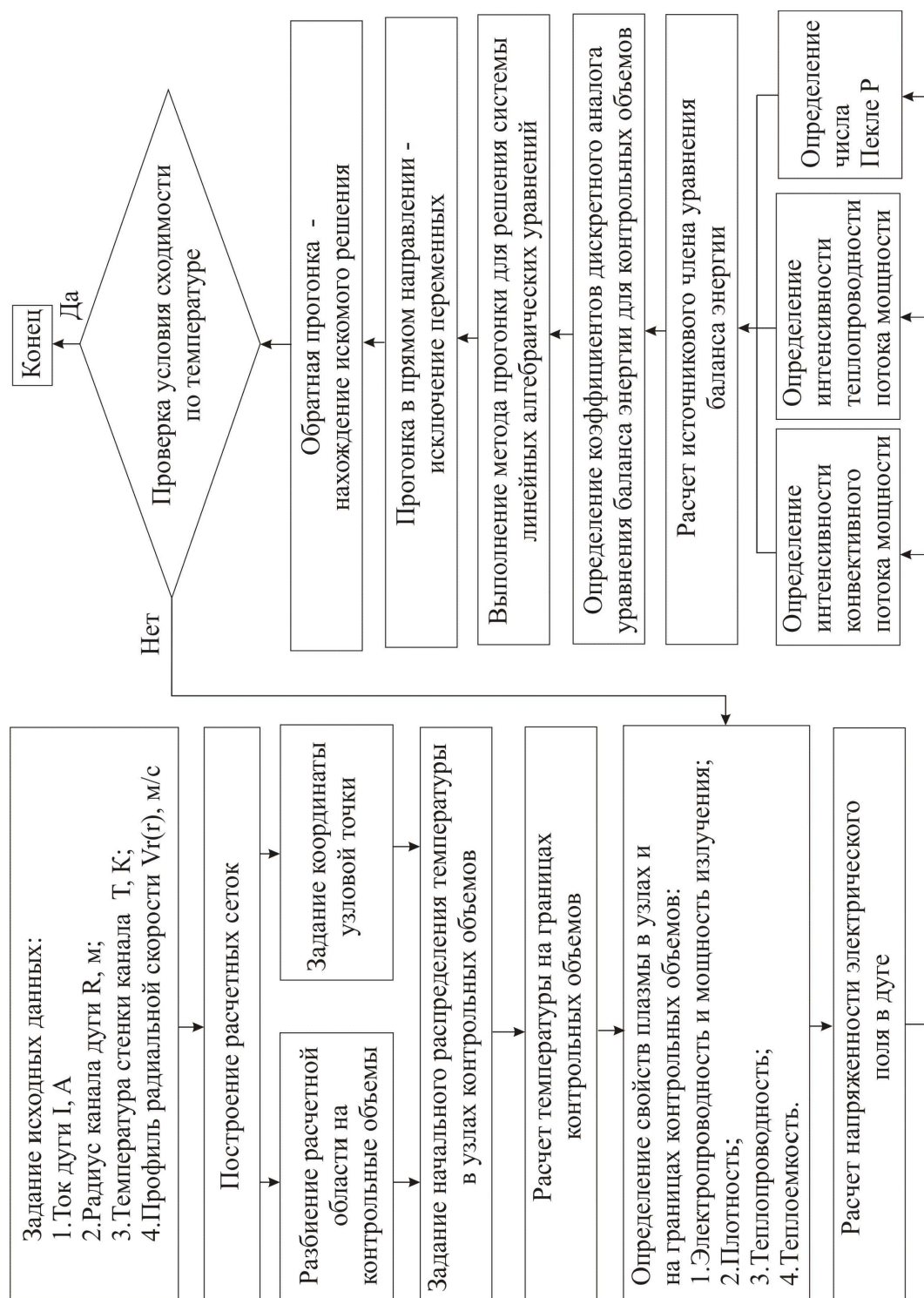


Рис. 2.17. Блок-схема расчета распределения температуры плазмы по сечению соплового канала плазмотрона при решении уравнения баланса энергии



Как правило, используемая в таких задачах функциональная математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений (Навье-Стокса, Фика, Максвелла и т. д.), описывающих газодинамические, теплофизические, электрические энергетические процессы, протекающие в плазмотронах. Структурные свойства объекта, как правило, учитываются в граничных условиях задачи. Такие модели сложнее, чем структурные, и простота, а иногда и возможность их исполнения во многом зависят от условий их применения и используемых допущений (учет температурной зависимости коэффициентов тепло- и массопереноса, точность входных данных, размерность задачи и т. д.).

В процессе автоматизированного проектирования неизбежно возникает необходимость оптимизации конструкции. В настоящее время существует большое количество предназначенных для этих целей программных средств. Однако средства автоматического определения конструкции путем объединения анализа и оптимизации в настоящее время еще недостаточно развиты [66] и применяются, как правило, только для простых объектов пониженной размерности. Применительно к процедурам проектирования в электроплазменных технологиях это означает итерационное использование оптимизационных методов на стадии анализа результатов работы САЕ-системы с последующей геометрической или параметрической корректировкой в подсистемах САПР. Тем не менее, важным достоинством методов анализа и оптимизации конструкции является возможность раннего выявления ошибок проектирования (до создания и исследования реального прототипа), а следовательно, существенного сокращения издержек на конструирование.

Эффективность автоматизированных методов проектирования можно повысить на базе полномасштабной интеграции технологий проектирования и производства. Это подразумевает внедрение в жизненный цикл продукта проектирования систем автоматизированного производства САМ (computer-aided manufacturing), предназначенных для планирования, управления и контроля за операциями производства (обычно средствами числового программного управления (ЧПУ) (numerical control – NC)). Интеграция CAD-, CAM- и CAE-систем в новую технологию компьютеризированного интегрированного производства CIM (computer-integrated manufacturing)

может сделать процесс проектирования и производства в электроплазменных технологиях единой автоматизированной высокоэффективной работающей системой (рис. 2.18).

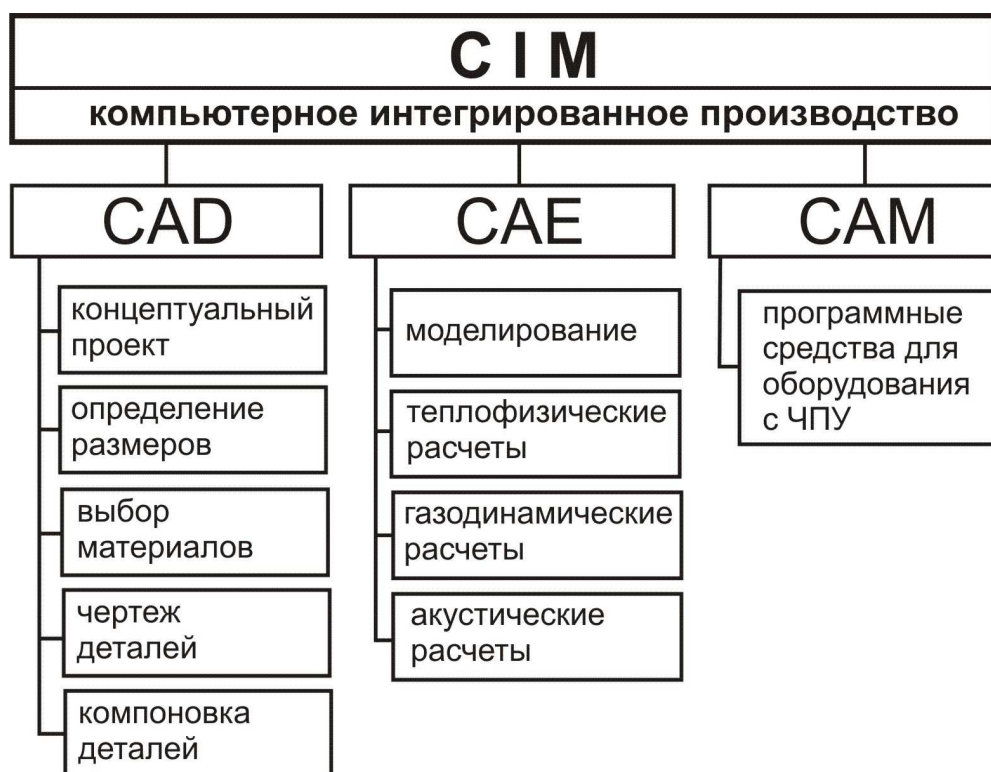


Рис. 2.18. Блок-схема компьютерно-интегрированного производства  
(для электроплазменных технологий)

Очевидно, что в основе применения технологий автоматизированного проектирования и управления лежит системный принцип. На этом же принципе базируется системотехника – теория организации процесса создания, использования и развития технических систем, а также методов и принципов их проектирования и исследования. В основе применения данной теории лежит умение организовать рассмотрение системы с точки зрения четко сформулированных функциональных целей и путем абстрагирования от несущественных факторов в процессе проектирования перейти к постановке оптимизационных задач. В структуре системотехники принято выделять следующие основные разделы [66]:

- построение иерархической системной структуры;
- организация проектирования системы;
- моделирование (modeling) и анализ (simulation);
- синтез (структурный и параметрический) и оптимизация.

Проектные процедуры анализа имеют целью определение выходных параметров системы и исследование функциональной работоспособности прибора. Процедуры синтеза, как правило, направлены на получение описания объекта проектирования. Последняя задача относится к сфере формирования моделей принятия проектных решений. Обычно синтез осуществляется с целью достижения экстремальных значений некоторых функционально значимых параметров, т. е. по сути является оптимизационной процедурой. Как правило, для проектирования характерны неполнота исходных данных и неопределенность условий принятия решений. В этой связи процедуры моделирования и оптимизации целесообразно выполнять с учетом не детерминированной, а статистической природы проектируемой системы с использованием соответствующих методов (метода Монте-Карло – при моделировании; методов экспертных систем, нечетких множеств, эволюционных вычислений – при принятии решений).

В основе метода структурной *оптимизации* обычно лежит сравнительный анализ различных вариантов структур проектируемой модели на основе ограниченного числа структурных элементов и объединение исследуемых структур в одну, обобщенную. Целью осуществляемого при этом структурного синтеза является разработка структуры объекта – перечня типов составных элементов модели и способов их связи между собой. Очевидно, что данный метод тесно связан с вариативными методами проектирования и подразумевает итерационное улучшение выходных параметров проектируемой системы в процессе нахождения новых сочетаний или исключения отдельных элементов структуры. Например, применение плазмотронов в технологиях высокотемпературного обезвреживания отходов возможно на разных стадиях технологической цепочки и позволяет решать разные задачи в зависимости от применяемого метода и вида обезвреживаемого продукта.

Процедура параметрического синтеза выполняется, как правило, на базе многовариантного анализа и является по сути задачей поиска оптимального (наилучшего) набора параметров неизменных по структуре элементов проектируемой модели, т. е., как уже упоминалось выше, является оптимизационной задачей. Такие задачи приходится решать и при проектировании электроплазменных технологий, поскольку, как уже отмечалось, такое проектирование связано с одновременным достижением взаимно конфликтных целей (функциональных, качественных, стоимостных, безо-

пасных, ресурсных и т. д.). В этой ситуации выбор предпочтительных вариантов, полученных в результате применения САПР, должен основываться на правилах предпочтения, а применительно к автоматизированным процедурам – на критериях оптимизации. При построении таких правил в формализованных методах проектирования обычно прибегают к оптимизации целевой функции  $F(x)$ , количественно выражающей функциональные свойства объекта. Построение данной функции основывается на установлении взаимосвязи между вектором выходных параметров  $y = (y_1, \dots, y_n)$  и вектором внутренних (управляемых) параметров  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . В зависимости от смысла целевой функции задачей такой оптимизации является нахождение ее экстремального значения ( $F(x) \rightarrow \text{extr}$ ) для определенного набора значений вектора параметров  $x$ , получаемого в процессе варьирования управляемыми параметрами в пределах некоторой допустимой области их значений.

Главной проблемой процедуры параметрической оптимизации является выбор самой целевой функции, что обусловлено многокритериальностью задач технологического проектирования и взаимной конфликтностью функционально значимых параметров. Одним из простейших, но не лучших, решений в этом случае является объединение нескольких противоречивых критериев в один (например, КПД плазмотрона). В других же случаях задача решается с учетом специфики проектируемого устройства. Например, при проектировании плазмотронов в качестве целевой функции использовались уже упомянутые выше интегральные энергетические и тепловые характеристики (см. формулы (2.1) и (2.2)), в качестве управляемых параметров – размерные комплексы функционально значимых для работы плазмотрона величин (силы тока  $I$ , напряженности электрического поля в плазменной дуге  $E$ , массового расхода  $G$ , диаметра выходного электрода  $d$ , давления в сопловом узле  $P$ ). В работе «Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма)» [16] приводятся функциональные соотношения для оценки длины начального участка плазменной дуги  $l_n$  во взаимосвязи с конструктивными ( $d$ ) и газодинамическими (расхода  $G$ , плотности  $\rho$ , скорости ПОГ  $u$ ) управляемыми параметрами. При этом в процедурах энергетического, теплофизического и газодинамического анализа используются и общепринятые методы критериального анализа с применением безразмерных чисел Рейнольдса  $Re$ , Стентона  $St$ , Эйлера  $Eu$ , Кнудсена  $Kn$  и т. д. Поскольку данные соотношения получены путем обобщения больших массивов данных, точность вычислений по ним составляет 6–8 % при достаточно широком диапазоне управляемых парамет-

ров (для однокамерного плазмотрона –  $I^2/(Gd) = 1 \cdot 10^7 \div 4 \cdot 10^{10} \text{ A}^2 \cdot \text{с}/(\text{кг} \cdot \text{м})$ ,  $G/d = 0,1 \div 2,0 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ ,  $Pd = (5 \div 35) \cdot 10^2 \text{ Н/м}$ ) [16]. Фактически это означает малую эффективность их применения для оценки результатов, достигнутых в ходе применения конструктивных методов проектирования, когда улучшение отдельных элементов конструкции дает улучшение выходного функционального параметра на 5–10 %. Очевидно также, что для повышения значимости целевой функции применительно к процедурам проектирования в электроплазменных технологиях необходимо в качестве критериев оптимизации принимать и параметры производительности, качества и безопасности, лишь косвенно связанные с упомянутыми ранее критериями. В свою очередь, учет только критериев качества или безопасности позволяет сформировать свои целевые функции и производить параметрическую оптимизацию проектируемых систем только по данным функциональным аспектам. Конкретные примеры таких процедур будут рассмотрены далее.

Помимо указанных особенностей оптимизационных процедур следует принимать во внимание и большое функциональное и конструктивное многообразие современных плазмотронов, каждый из которых требует своих специфических критериев для оптимизации. Получить эти критерии можно путем обобщения накопленных за последние годы экспериментальных данных. К сожалению, коммерческий характер большинства современных разработок в области электроплазменных технологий обуславливает закрытость принципиальных конструктивных решений для широкого экспериментального анализа, что негативно сказывается на перспективах построения требуемых функциональных моделей. Фактически подобные обобщения в настоящее время возникают только применительно к тем группам плазмотронов, которые разрабатываются и исследуются в конкретном научном подразделении (ИБТ РАН<sup>1</sup> [21], ИТФ<sup>2</sup> и ИПТМ СО РАН<sup>3</sup> [16], ИПЭФ РАН<sup>4</sup>) и не охватывают модели зарубежных производителей. В этой связи актуальной представляется задача упрощения процедур расчета критериальных параметров для плазмотронов со сложными системами подачи ПОГ в сопловой узел (газовоздушными трактами – ГВТ), необходимых для применения оптимизационных процедур.

---

<sup>1</sup> ИБТ РАН – Институт вычислительных технологий Российской академии наук.

<sup>2</sup> ИТФ – Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау.

<sup>3</sup> ИПТМ СО РАН – Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Сибирского отделения Российской академии наук.

<sup>4</sup> ИПЭФ РАН – Институт проблем электрофизики Российской академии наук.

Ввиду невозможности полной автоматизации процедуры поиска оптимального решения свойственных для проектирования электроплазменных технологий задач многокритериальной оптимизации, а также невозможности выбора наилучшего варианта окончательное решение является результатом применения так называемых компромиссных методов оптимизации. В этом случае, очевидно, возрастает роль субъективных факторов, поскольку компромисс разрешается путем введения тех или иных дополнительных ограничений или субъективных предположений. Можно, например, использовать оптимизацию по Парето – путем выделения области компромиссов и применения математического алгоритма выбора нехудших решений, опирающегося на метод предпочтения бинарных отношений (парного сравнения) теории принятия решений. Эффективность данного метода снижается при увеличении числа критериев и целесообразна при одновременном учете от 2 до 5 критериев. Следовательно, актуальной становится задача выбора приоритетных критериев из всего упомянутого выше многообразия характерных для электроплазменных технологий параметров и соотношений. Такими критериями могли бы стать тепловой КПД и вольтамперные характеристики, а также удельная производительность, удельная себестоимость и уровень шума (применительно к технологии плазменной резки).

Желаемое упрощение оптимизационной процедуры иногда достижимо за счет сведения задачи к однокритериальной с ее последующим решением методами скалярной оптимизации. Для этого требуется знание (иногда в форме гипотез или предположений) о функциональной взаимосвязи учитываемых критериев, что позволяет выбрать единственный критерий из нескольких или объединить (свернуть) их в один, ввести общие единицы измерения для всех критериев и т. д. Как правило, в этом случае прибегают к процедуре ранжирования критериев, проводя оптимизацию по главному из них с последующей корректировкой, учитывающей менее важный критерий, и т. д. Например, процедуру оптимизации при проектировании плазмотронов в первом приближении допустимо провести по известным энергетическим критериям, однако более строгое следование системным принципам требует дальнейшей корректировки по параметрам эффективности и безопасности. Разумеется, в процедуре ранжирования существенную роль играет субъективный фактор (опыт и квалификация разработчика), однако, как правило, в основе лежат функциональные требования, закладываемые в тех-

ническое задание на начальном этапе проектирования. В результате значимость отдельных критериев может оказаться разной применительно к плазмотронам разной функциональной направленности (инструментальные, научно-исследовательские, плазмохимические и т. д.).

В качестве общей единицы измерения критериев обычно используют стоимостные показатели, включающие, с одной стороны, производственные и эксплуатационные издержки, затраты на проектирование, стоимость достижения требуемых показателей качества и безопасности и т. д., а с другой – доходы от применения и снижения технологических и социальных издержек. Разумеется, для сравнения и выбора наиболее предпочтительных вариантов такие показатели должны рассчитываться в удельных единицах. Например, для технологий плазменной разделки универсальными критериями эффективности могут быть удельная производительность (т/(чел. × мес.)) и удельные энергозатраты (р./т). Предпочтение тому или иному варианту отдается в данном случае по величине экономической эффективности (разности удельных доходов и расходов).

Целью процедуры свертки (объединения) векторного критерия является переход к рассмотренному выше методу оптимизации целевой функции. С учетом ранжированности критериев простейший вариант ее представления есть аддитивная функция вида  $f_j = \sum g_i \cdot K_{ij}$ , где  $K_{ij}$  – соответствующий  $i$ -й критерий ( $i = 1, I, \dots, I_m$ ) с соответствующим весовым коэффициентом (рангом)  $g_i$  (обычно  $\sum g_i = 1$ ), рассчитываемая для каждого  $j$ -го варианта ( $j = 1, \dots, n$ ). В более сложном случае используют мультипликативную целевую функцию, вычисляемую как произведение отдельных критериев с соответствующими степенями  $g_i$ , т. е.  $f_j = \prod (K_{ij})^{g_i}$  [67].

### 2.3.3. Экспериментальные методы

Важную роль в общей стратегии проектирования плазменного оборудования играют экспериментальные методы. Физическая сложность многочисленных процессов, которые необходимо учитывать при проектировании, делает полную формализацию этой процедуры невозможной. В результате возникает потребность в получении достоверных исходных данных, важных как для дальнейшего проектирования, так и для экспериментального подтверждения полученных промежуточных результатов. В первом случае сбор информации происходит в процессе экспериментальных исследований (количественных измерений, анализа) функциональных и конструктивных па-

раметров проектируемого объекта, а также физико-химических характеристик учитываемых при проектировании явлений. Второй случай, как правило, относят к испытаниям (их общая процедура регламентируется соответствующими стандартами), в ходе которых обычно производится оценка или выявление соответствия определяемых параметров проектируемым.

Структура необходимой для проектирования плазматронов информации (экспериментальных данных и параметров испытаний), а также применяемых для ее сбора методов представлена на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Методы экспериментальных исследований функциональных параметров плазмотрона



Как известно, создание первых плазмотронов в середине 50-х гг. XX в. – техническое воплощение результатов многочисленных теоретических и экспериментальных исследований по физике плазмы, газодинамике, электрофизике, материаловедению, осуществленных к этому времени и продолженных в связи с бурным развитием плазмотронной отрасли.

В ходе таких исследований был накоплен большой фактический материал, касающийся поведения потоков различных плазмообразующих газов в условиях существования низкотемпературной плазмы, решены материаловедческие вопросы стойкости электродов и сопловых узлов плазмотронов, проведена оценка эффективности их работы, собраны сведения о негативных факторах электроплазменных технологий. И здесь применялись не только стандартизованные измерения, но и был создан целый комплекс специфических процедур – для диагностики характерных исключительно для плазмотронов параметров [16, 14, 18, 19]. За 50 с лишним лет, прошедших с начала таких исследований, эти методы претерпели закономерную трансформацию, связанную с заменой и расширением приборной базы, повышением точности и дискретности измеряемых данных, появлением возможностей анализа многомерных моделей с применением автоматизированных процедур.

Оценка эффективности работы плазмотрона осуществляется по его способности преобразовывать электрическую энергию в тепловую, а следовательно, требует диагностики его электрических и тепловых параметров. Если для измерения первых иногда можно применить стандартизованные электроизмерительные методики (мостовые схемы, осциллографический анализ и т. д.), то для определения тепловых характеристик, как правило, используют целый набор измерительных методов. Измерение тепловых потоков обычно производится стационарными методами с применением калориметров (охлаждаемых, точечных, линейно-цилиндрических, точечных) и нестационарно, используя тонкопленочные и массивные термометры сопротивления, а также динамические термопары, энтальпийные зонды Грея и градиентные датчики. Локализация потоков производится за счет применения мерных дисков (теплоизолированных шайб-дисков) и исследуется на геометрически и технологически подобной реальной конструкции модели.

Температурные измерения, играющие большую роль в диагностике и испытаниях плазменной техники, опираются на широкий набор экспериментальных методик. Наибольшее применение получили оптические мето-

ды, основанные на спектральном анализе излучения плазменной дуги в видимом и инфракрасном диапазоне. Первоначально используемые методы фото- и видеорегистрации (с моделями в виде кварцевых трубок или секционных межэлектродных вставок с поперечной щелью для внутриобъектной визуализации) в 1990-е гг. были дополнены методами томографического (2- или 6-ракурсное просвечивание или исследование излучения), а в 2000-е гг. – методами LIF (лазер-индуцированной флуоресценции), эндоскопического анализа и т. д. Спектроскопический анализ, помимо температурных распределений, позволяет расчетными методами определять и большинство других, необходимых для диагностики плазменной дуги, параметров: плотность, состав, коэффициенты переноса (электро- и теплопроводности, диффузии, вязкости), сечения соударений и рассеяния, плотность тока и т. д. Использование таких методов в сочетании с зондовой диагностикой (применением локальных, подвижных, периферийно-кольцевых, «стреляющих» и т. д. зондов) дает возможность измерять приэлектродное падение потенциала, напряженность электрического поля и плотность тока в дуге, а с калориметрическими методами – термодинамические характеристики (энтальпию, энтропию, теплоемкость) и энергетический баланс. Помимо оптических методов при измерении среднемассовых температур плазменного потока (атомно-ионного газа) используют традиционные теплофизические методы – по энтальпии на охлаждаемом датчике или по теплоотдаче поперечно-обтекаемому цилиндру, с применением термоанемометров и т. д. Поскольку большинство упомянутых параметров получается расчетным путем с использованием экспериментально измеряемых данных, актуальной остается задача выбора соответствующих физических и расчетных моделей. Оценки, в частности, теплового КПД или энергетического баланса могут в зависимости от применяемой методики измерений и расчета существенно отличаться друг от друга для однотипных конструкций [14] и требуют дополнительного рассмотрения или аппроксимирующей обработки.

Важным элементом экспериментальной диагностики является измерение газодинамических характеристик потока плазмообразующего газа и плазменной дуги (струи). Для визуализации течения газа в него вводились дым, песчинки или струи жидкости, капли масла, а сами исследования, как правило, проводились на моделях из прозрачного оргстекла [16] путем скоростной видео- или фотосъемки. Введение в поток датчиков и зондов (трубок Пито, Прандтля, тел различной степени обтекаемости

и т. д.), использование оптических методов (фотоэлектрического метода колебаний излучения, лазерной интерферометрии) способствовало тому, что было собрано большое количество информации о локальных распределениях скоростей потока и переносимых им частиц, давлении в потоке, степени его турбулентности, а стандартизованных измерений интегральных параметров – о расходе и усредненных газодинамических характеристиках. Среди последних современных методик отметим PIV (Particle Image Velocimetry) – технологию, недавно разработанную и внедренную Институтом теплофизики СО РАН. Метод основан на освещении импульсными лазерными вспышками взвешенных в потоке частиц-меток с последующей фиксацией цифровой камерой и компьютерной обработкой изображения (пакет  $\sigma$ Flow). По смещению частиц за известный промежуток времени определяется мгновенное поле скоростей – как двумерное, так и трехмерное (при стереосъемке), а после обработки можно рассчитать завихренность, корреляционные статистические моменты до 4-го порядка, турбулентные характеристики. Применяя дополнительно лазер-индуцированную флуоресценцию, можно измерять поля температур, скоростей в пламени, получать данные по тонкой структуре основных режимов течения. К сожалению, задача непосредственного измерения газодинамических параметров потока ПОГ, протекающего по газовоздушному тракту плазмотрона, по-прежнему остается трудноразрешимой. Применение для этого модельных измерений, так же, как и внесение датчиков и зондов в поток газа или плазмы, сопровождается искажением реальных газодинамических условий протекания среды, а доступ к отдельным элементам конструкции плазмотронов в эксплуатационном режиме зачастую оказывается технически невозможным. По этой причине актуальной остается задача разработки методов расчета и оценки таких параметров по всему газовому тракту плазмотрона с учетом экспериментально определяемых их значений на входе и выходе из него. Очевидно, подобная же задача должна решаться применительно к водяным и воздушным системам охлаждения плазмотронов.

В ходе испытательных процедур помимо проверки на соответствие заявленных параметров производительности проектируемого объекта обязательно должны быть проведены измерения параметров, обеспечивающих функционирование устройства или технологии, по критериям надежности, качества и безопасности. Как уже отмечалось ранее, надежность работы плазмотрона тесно связана с ресурсом его электро- и теплонагруженных элементов –

электродов и соплового узла. Как правило, исследуются эмиссионные и эрозийные свойства этих элементов – с применением широкого арсенала методов неразрушающего контроля (поверхностная микроскопия, пирометрия и т. д.) и металлографического анализа. Эти же методы, дополненные газоаналитическими исследованиями, преимущественно применяют и для измерений регламентируемых стандартами параметров качества работы плазменных резаков.

Отдельно следует отметить необходимость исследования эффективности работы электроплазменного оборудования по критериям безопасности. Очевидно, что опасные факторы плазменных технологий (высокий электрический ток и напряжение, высокое давление плазмообразующего газа) должны измеряться стандартизированной аппаратурой и анализироваться на предмет соответствия требованиям определенных СНиПов и ГОСТов. Вредные факторы (шум, ультразвук, пыле- и газовыделение, оптические, тепловые, ионизирующие и электромагнитные виды излучения) также требуют исследования на соответствие нормам безопасности и возможность применения для каждого фактора характерного метода измерений. В настоящее время существует большое количество таких методов, использующих высокоточную измерительную аппаратуру, однако их применение в реальных условиях функционирования электроплазменной технологии, как правило, затруднено из-за необходимости соблюдения норм безопасности. По этой причине приходится либо проводить измерения вредных факторов в имитирующих условиях (на «холодной» модели без зажигания дуги) с последующей аппроксимацией на условия реального применения, либо адаптировать экспериментальные методики с учетом специфики применения электроплазменных технологий. Подобный метод для измерения акустического фактора применительно к плазменным процессам был разработан с участием автора и применен для полномасштабного исследования проблемы шумового загрязнения в рассматриваемых технологиях [27, 28, 46, 47, 56]. В связи с этим следует еще раз обратить внимание на необходимость учета влияния конструктивных особенностей газоздушного тракта плазмотрона на газодинамику течения ПОГ. Трудность непосредственного экспериментального измерения параметров, существенным образом определяющих характер акустического излучения плазмотронов, делает необходимой разработку методов их расчета внутри ГВТ для последующего использования при оценке эффективности проектирования по критериям безопасности.

В заключение отметим еще раз увеличение в общем объеме как формализованных, так и экспериментальных методов доли процедур, относящихся

к сфере *машинного эксперимента*. Фактически любой современный измерительный комплекс оснащен внутренним или, через интерфейс, внешним алгоритмом анализа и программной обработки данных, что позволяет во много раз повысить скорость реализации и эффективность экспериментальных методов. Тем не менее, невозможность абсолютной алгоритмизации проектных процедур оставляет место и для *мысленных экспериментов*, нужных, как правило, для быстрого получения качественного или оценочного результата. Следует упомянуть и так называемые *полуэмпирические* методы исследования и проектирования, когда эксперимент является только ступенью к применению других методов анализа. Применительно к процедурам конструирования плазмотронов к данной категории можно, например, отнести разработанную в 70–80-е гг. XX в. методику оценки эффективности проектирования геометрически подобных плазмогенераторов по критериальным соотношениям их конструктивных и технологических параметров. Отметим в этой связи, что применение таких расчетов может дать погрешность гораздо выше заявленных 6–8 % [16] в связи с использованием для расчета трудноопределимых газодинамических параметров и требует корректировки с учетом их изменений, обусловленных профилем ГВТ плазмотрона.

Анализ упомянутых методов проектирования позволяет сделать важный для разработчика плазмотронов вывод о существенном влиянии функциональных (расход, давление) и геометрических параметров на показатели эффективности работы плазменного генератора. Таким образом, одной из задач проектирования становится параметрическая оптимизация по упомянутым выше критериям. Однако помимо легко определяемых электрических и конструктивных параметров в такого рода расчетах используются и газодинамические характеристики, значения которых в формирующей плазменную дугу (струю) сопловом узле плазмотрона трудноизмеряемы и могут сильно отличаться от параметров на входе в плазмотрон. Как показали проведенные нами исследования, конструктивные особенности газовоздушных трактов плазмотронов не только оказывают серьезное влияние на газодинамику и процесс формирования плазменной струи, но и существенным образом определяют характер шумоизлучения плазмотрона, а следовательно, и безопасность его применения. Поскольку газодинамический расчет всех элементов газовоздушного тракта достаточно трудоемок, задача формулирования общих принципов и методов проектирования плазмотронов, существенно влияющих на эффективность и безопасность их работы, остается актуальной.

### 3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

#### 3.1. Физические основы плазменной и микроплазменной сварки

Сварочные технологии занимают значительный объем в производственных процессах во многих отраслях промышленности. Наибольшее применение в настоящее время имеют газовая сварка, пайка и дуговая сварка неплавящимся электродом в непрерывном и импульсном режимах. Работы по использованию для сварки металлов малой толщины сжатой дуги были начаты в начале 60-х гг. XX в. в Научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИАТ) и в ряде фирм Швейцарии, Англии, США и Франции. Такой способ получил название микроплазменной сварки, а сварочная горелка, используемая для этого, была названа микроплазмотроном.

**Плазменная сварка** – это разновидность дуговой сварки плавлением. По параметру плотности энергии она занимает промежуточное положение между лазерной, электронно-лучевой и дуговой сваркой, поэтому сварные соединения, выполненные плазменной сваркой, менее подвержены короблению и трещинообразованию. Однако несмотря на лучшие энергетические характеристики, технологии плазменной сварки уступают автоматической дуговой сварке плавящимся электродом по стоимости оборудования и скорости сварки, что сдерживает их применение и развитие [1]. В настоящее время наиболее успешно плазменная сварка (сварка сжатой дугой) применяется при изготовлении изделий из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама и многих других металлов и сплавов в авиационной и электронной промышленности, судостроении, корпусных деталей и узлов специальной техники, в том числе боевых машин пехоты из легких сплавов, в нефтехимическом машиностроении (рис. 3.1) и ряде других отраслей.

Разновидностью плазменной сварки является **микроплазменная сварка**, физическая суть которой заключается в обеспечении стабильного горения сжатой дуги на очень малом токе. Наибольших успехов в разработке микроплазменной сварки достиг ИЭС им. Е. О. Патона. Однако микро-

плазменной сварке в настоящее время очень сложно конкурировать (помимо цены) с маломощной волоконной лазерной сваркой.



Рис. 3.1. Плазменная сварка трубопроводов

Прототипом для микроплазменной сварки послужила аргоно-дуговая (аргонодуговая, аргонно-дуговая) сварка неплавящимся электродом. Схема аргоно-дуговой горелки представлена на рис. 3.2 [7]. Сварка осуществляется на прямой полярности. Вольфрамовый стержень *1* служит катодом, свариваемое изделие – анодом. В конструкции всех аргоно-дуговых горелок основную роль играет цанговый охлаждаемый или неохлаждаемый зажим *2* для крепления вольфрамового катода. Цанговый зажим снабжен керамическим соплом *4* для подачи защитного газа и ручкой *7*, внутри которой расположены газо- и водоподводы. Токоподвод обычно совмещен с водоподводом; если он отсутствует, то с газоподводом.

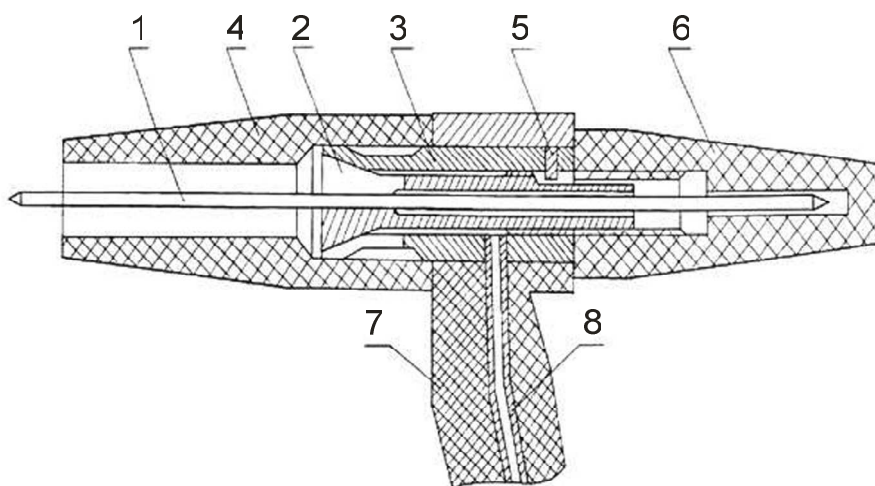


Рис. 3.2. Аргоно-дуговая горелка:

*1* – катод; *2* – цанга; *3* – корпус; *4* – сопло; *5* – штифт; *6* – изолятор; *7* – ручка;  
*8* – токоподвод, совмещенный с газоподводом

Дуга поджигается осциллятором либо касанием вольфрамового электрода с изделием. Первый способ предпочтительнее, так как при поджиге дуги касанием на конце вольфрамового стержня образуется односторонняя оплавленная полусфера, из-за чего происходит пространственное отклонение дуги от оси электрода. В результате снижается качество сварки изделий и возникает необходимость частой перезаточки вольфрамового электрода. Аргон в горелках способствует пространственной стабилизации дуги и защищает от окисления вольфрамовый катод и металл изделия в окрестностях сварочного шва. Несмотря на высокую температуру аргоновой дуги, при атмосферном давлении (более 10 000 К) основным источником тепла (примерно 80 %), расплавляющего металл в сварочном шве, является тепловой поток от прианодной области, регулируемый силой тока.

Основным отличием сварочных плазмотронов от обычных является использование сжатой дуги вместо свободной. При этом эффект плавления достигается не за счет выделения тепла в анодном и катодных пятнах (свободная дуга), а путем термического воздействия искусственно удлиненного столба сжатой дуги с высокой плотностью энергии.

Анализ результатов плазменной сварки на больших токах показал, что обжатая дуга, формируемая каналом сопла (рис. 3.3), имеет большую пространственную устойчивость, чем свободно горящая в аргоно-дуговых горелках. Это преимущество обжатой дуги применимо также и для сварки металлов малых толщин ( $d < 1$  мм), что обусловило появление по существу нового способа – микроплазменной сварки, т. е. сварки тонких и особо тонких металлов.



Рис. 3.3. Плазменная сварка сжатой дугой



Первые плазменные горелки были созданы на базе аргоно-дуговых (рис. 3.4, *а*) и отличались от них тем, что неплавящийся вольфрамовый электрод и часть столба дуги помещались в водоохлаждаемую металлическую камеру. Камера оканчивалась цилиндрическим отверстием (соплом), расположенным соосно с электродом (рис. 3.4, *б*). Плазмообразующий газ, проходя через сопло, пространственно стабилизировал (обжимал) столб дуги, а также обеспечивал его тепловую и электрическую изоляцию от стенок сопла. Часть газа проходила через дугу, ионизировалась и превращалась в плазму.

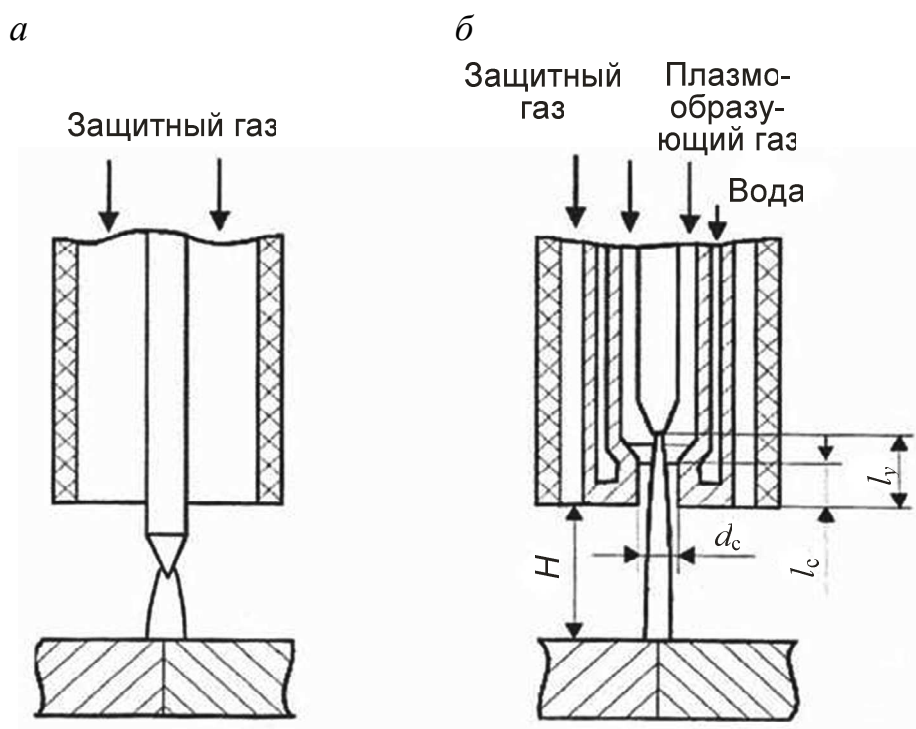


Рис. 3.4. Схема сопловых частей [7]:  
*а* – аргоно-дуговой горелки; *б* – плазменной горелки

Сжимающее дугу сопло имеет два важных размера: диаметр выходного отверстия  $d_c$  и длину  $l_c$ . Расстояние, на котором установлен электрод от выходного отверстия сопла, называется углублением электрода  $l_y$ , а расстояние между внешней поверхностью (торцом) сопла и свариваемым изделием – рабочим расстоянием  $H$ . Кроме плазмообразующего газа при выполнении большинства сварочных операций через наружное газовое сопло подается газ для защиты сварочной ванны и кристаллизирующегося металла от окисления (защитный газ). При сжатии дуги соплом столб дуги вне сопла принимает цилиндрическую форму (см. рис. 3.3 и 3.4, *б*), анодное пятно стабилизируется на изделии, тепловой поток становится более

сосредоточенным, чем при открытой дуге, глубина проплавления металла возрастает, снижается нагрев металла, прилегающего к шву.

Сварка изделий из металлов, не имеющих поверхностной окисной пленки (сталь, медь и др.), производится плазмотронами прямой полярности. Внутренний электрод – катод (вольфрамовый стержень), изделие – анод.

Качественная сварка тонкостенных изделий из металлов, имеющих окисную поверхностную пленку (алюминий и др.), возможна только при катодной очистке свариваемых поверхностей. Поэтому свариваемое изделие в этом случае является катодом сварки на обратной полярности. Сущность катодной очистки поверхности от окислов состоит в следующем. Катодное пятно (макропятно) в отличие от анодного имеет неоднородную структуру и состоит из отдельных кратковременно существующих микропятен. Плотность тока в микропятнах составляет  $10^5 \dots 10^6$  А/см<sup>2</sup>, а время их существования –  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  с. Малая по размерам прикатодная область дуги фактически является генератором высокоэнергетических микродуг, возникающих в результате микрошунтирования в катодном пятне с частотой

$f = \frac{I}{I_{\mu} \tau_{\mu}}$  Гц, где  $I$  – ток дуги;  $I_{\mu}$  – среднее значение тока микродуг

( $I_{\mu} = 8$  А);  $\tau_{\mu}$  – время жизни микропятна,  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  с. Частота возникновения микродуг равна примерно  $10^6$  Гц. В силу того, что окислы металлов по сравнению с чистыми металлами имеют меньший потенциал работы выхода электронов, микропятна возникают на окисленных участках свариваемых изделий, обеспечивая очистку металла даже в зазорах между свариваемыми кромками. Таким образом, изделие в области сварного шва очищается непосредственно во время сварки.

### **3.2. Принципы и методы проектирования плазмотронов для сварки**

Как уже отмечалось, сжатая дуга формируется специальными горелками – плазмотронами. На рис. 3.5, а представлен внешний вид, а на рис. 3.5, б – принципиальная схема сварочного плазмотрона, работающего на прямой полярности (разработка кафедры сварочного производства ПНИПУ<sup>1</sup>). Плазмотрон может иметь модификации для работы на токах средней (15–200 А) и высокой (20–400 А) мощности и предназначен для автоматической (прони-

---

<sup>1</sup> ПНИПУ – Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

кающей или расфокусированной дугой) и ручной плазменной сварки на токе прямой полярности конструкций из легированных и высоколегированных сталей, титановых (толщиной 2–18 мм), медных и сложнолегированных (толщиной 2–12 мм) сплавов. Конструкция плазмотрона включает в себя корпус – несущую деталь, в котором выполнены газо- и водоподводящие магистрали; вольфрамовый электрод, играющий роль катода; электрододержатель плазмообразующего и защитного сопел; изолятор.

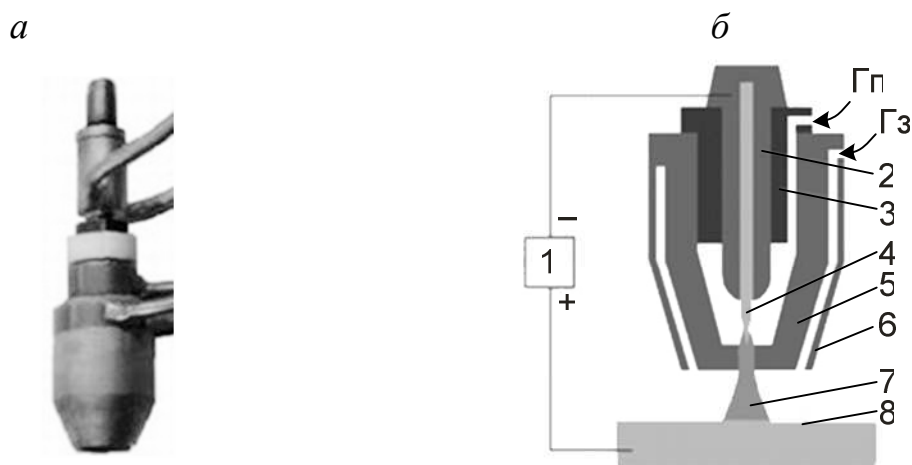


Рис. 3.5. Плазмотрон для сварки прямой полярности:

*а* – внешний вид; *б* – принципиальная схема:

1 – источник питания сжатой дуги; 2 – электрод-анод; 3 – изолятор-завихритель;  
4 – электрод-катод; 5 – плазмообразующее сопло; 6 – защитное сопло; 7 – сжатая дуга;  
8 – изделие;  $\Gamma_{п}$  – плазмообразующий газ;  $\Gamma_{з}$  – защитный газ

На рис. 3.6 представлен общий вид микроплазмотрона, предназначенного для сварки тонкостенных труб на прямой полярности в автоматическом режиме [7].

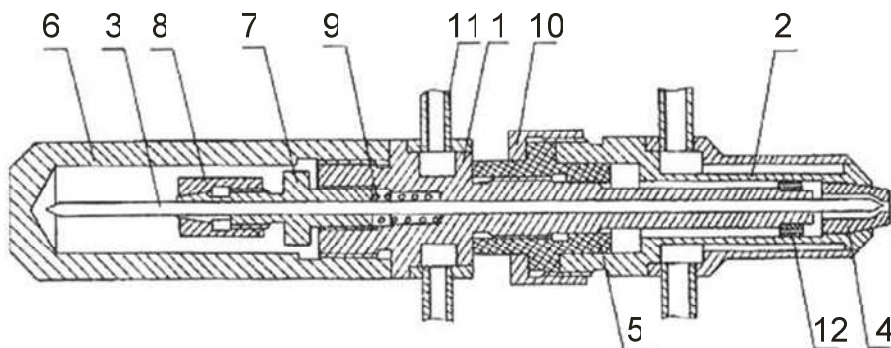


Рис. 3.6. Общий вид плазмотрона для сварки тонкостенных труб:

1 – катодный корпус; 2 – сопловый корпус; 3 – катод; 4 – сопло; 5 – изолятор;  
6 – колпак; 7 – гайка; 8 – цанга; 9 – пружина; 10 – гайка; 11 – штуцер; 12 – изолятор

Плазмотрон состоит из двух основных частей: катодного корпуса 1, в котором размещены цанга 8 и электрод 3, и соплового корпуса 2 с соплом 4. Оба корпуса электрически разделены изолятором 5 и охлаждаются водой. Плазмообразующий газ (аргон) подается через штуцер 11.

Качество микроплазменной сварки во многом зависит от соосности электрода с отверстием сопла. В плазмотроне, изображенном на рис. 3.6, центровка обеспечена тем, что большая часть вольфрамового стержня со стороны рабочего конца помещена в протяженную цилиндрическую трубу 1. Расстояние  $l_y$  (см. рис. 3.4, б) между электродом и соплом, важное для обеспечения качества сварки и надежности плазмотрона, легко устанавливается и регулируется поворотом цангового зажима 8 (см. рис. 3.6).

Надежность работы плазмотрона и стабильное качество сварки труб зависят от многих факторов. Например, значения тока дуги в процессе сварки не должны отклоняться от необходимого более чем на 3 %. Однако при неправильном выборе режима сварки возможно появление нерегулярных колебаний тока и напряжения с амплитудой отдельных выбросов по току и напряжению до 15 %. Основной причиной возникновения крупномасштабных колебаний тока дуги является ее шунтирование в промежутках «катод – сопло», «сопло – изделие».

На острие вольфрамового стержня могут вырасти «усы» в виде короны, образование которых обусловлено возвратом под действием электрического поля части испарившихся атомов вольфрама в виде положительных ионов обратно на электрод. Это явление носит название рециклинга. Оно проявляется тем сильнее, чем больше ток дуги и чем меньше диаметр электрода.

Переход при сварке от труб с одной толщиной стенки к трубам с другой толщиной стенки, как правило, требует для обеспечения максимальной производительности сварочного стана его переналадки. Скорость протяжки ленты и формовки заготовки трубы в сварочном стане регулируется дискретно, и поэтому необходимо заранее знать, каковы должны быть ток и скорость сварки, расход плазмообразующего газа и основные размеры сопла и электрода. Анализ литературы и экспериментальных данных позволил вывести формулы, позволяющие заранее рассчитать все основные параметры процесса сварки в автоматическом режиме.

Оптимальная скорость сварки, при которой достигается высокое качество стальных труб, рассчитывается по формуле

$$v = 0,015 \cdot I / \delta, \text{ м/мин,} \quad (3.1)$$

где  $I$  – ток дуги, А;

$\delta$  – толщина стенки трубы, мм.

Оптимальный диаметр вольфрамового электрода

$$d_3 = \sqrt{\frac{I}{14}}, \text{ мм.} \quad (3.2)$$

Диаметр сопла

$$d_c = d_3 / 1,25, \text{ мм.} \quad (3.3)$$

Длина линейной части сопла

$$l_c = d_c / 1,25, \text{ мм.} \quad (3.4)$$

Расход аргона через плазмотрон при  $d_c \geq 1,4$  мм составляет

$$G_{Ar} = 0,0125 d_c, \text{ г/с.} \quad (3.5)$$

Расход аргона, подаваемого в фильерный узел (защитный газ):

$$G_3 = 0,03 d_c, \text{ г/с.} \quad (3.6)$$

Ошибки в выборе  $v$ ,  $d_3$ ,  $d_c$ ,  $l_c$  корректируются подбором величины тока. Точность формул составляет  $\pm 10\%$ . Такая точность обусловлена тем, что качество сварки зависит не только от перечисленных параметров, но и от марки стали, заточки электрода, обтекаемости сопла (качества его изготовления), износа фильеры и других, менее значимых, факторов.

При сварке на прямой полярности в качестве электрода используются вольфрамовые стержни. Они крепятся в цанговых зажимах, их легко заменять. Газозащитный вольфрамовый электрод – самый распространенный из всех видов электродов. Вольфрам имеет высокую прочность и достаточно высокие электро- и теплопроводность. При работе в инертной среде (аргон, гелий) при нагрузке  $j = 15 \dots 20 \text{ А/мм}^2$  вольфрам практически не расходуется. Однако при сварке на обратной полярности стержни можно использовать только при малых токах, так как тепловой поток в анод при прочих равных условиях почти в 2 раза больше, чем в катод. По этой причине сечение

вольфрамового электрода при обратной полярности должно быть в 9 раз больше, чем при прямой. Вот почему в сварочных плазмотронах обратной полярности применяются составные паяные или прессованные медно-вольфрамовые водоохлаждаемые аноды. Поперечные геометрические размеры электродных узлов с составными анодами существенно больше, чем со стержневыми, что ведет к увеличению размеров плазмотронов.

С помощью электроимпульсной сварки вольфрамовых стержней с медными можно изготавливать составные медно-вольфрамовые аноды, имеющие меньшие поперечные размеры, удовлетворительное охлаждение вольфрама и более обтекаемую форму, чем у паяных анодов. Наилучшие результаты достигаются при осадке расплавленной меди на вольфрамовую вставку. Стойкость таких анодов по данным кафедры сварочных технологий ПНИПУ достигает 100–300 ч при рабочем токе до 300 А при 100–500 включениях.

На рис. 3.7 представлен общий вид плазмотрона обратной полярности с обжатой дугой [7]. Плазмотрон разработан для сварки тонкостенных алюминиевых труб (с толщиной стенки  $\delta > 0,5$  мм) в автоматическом режиме. Данный плазмотрон не имеет дополнительного сопла для подачи защитного газа, так как сварка трубы происходит в фильерном узле, куда также подается аргон.

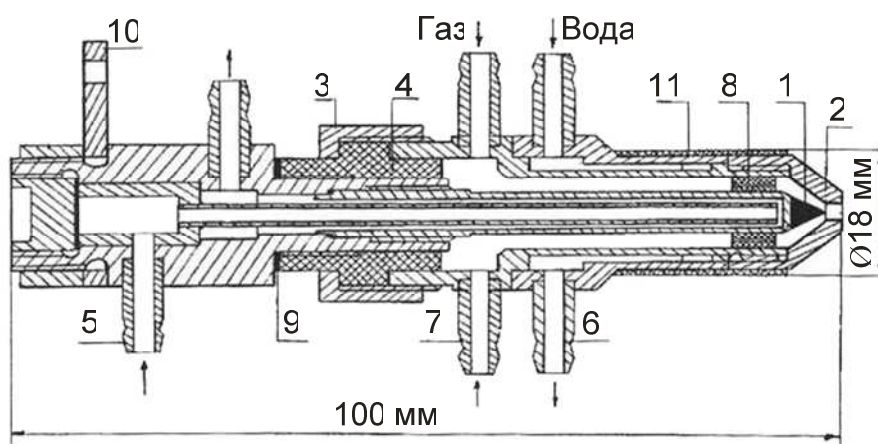


Рис. 3.7. Плазмотрон для сварки изделий на обратной полярности:

1 – вольфрамовый анод; 2 – сопло; 3 – гайка; 4 – изолятор; 5–7 – штуцеры;  
8 – изолятор; 9 – резиновая прокладка; 10 – токоподвод; 11 – изолятор

Составной медно-вольфрамовый электрод успешно служит не только анодом, но и катодом. Поэтому представленный на рис. 3.7 плазмотрон

может после смены полярности подключения электродов на одном и том же сварочном стане использоваться для сварки не только алюминиевых, но и стальных, и медных труб. Использование такого плазмотрона делает установку для сварки труб универсальной, что очень важно на практике, особенно в мелкосерийном производстве.

Вольт-амперные характеристики дуги данного плазмотрона как при прямой полярности подключения электродов, так и при обратной – слабо падающие. Они различаются только тем, что напряжение на дуге при обратной полярности на 3–4 В выше, чем при прямой. Это позволяет использовать один и тот же источник питания для сварки широкого круга металлов, в том числе имеющих оксидную пленку.

Опыт эксплуатации плазмотрона показал, что один и тот же электрод с острой заточкой не следует использовать в широком диапазоне тока, так как при его увеличении свыше 40 А возможно одностороннее оплавление вершины электрода. Это ведет к отклонению столба дуги от оси отверстия в сопле и снижению качества сварки.

Для токов от 4 до 40 А рекомендуется острая заточка с углом  $\alpha = 32^\circ$  (рис. 3.8, а). Для токов 30...80 А форма заточки более сложная с дополнительным углом  $\beta = 60^\circ$  (рис. 3.8, б). Для диапазона 60...150 А форма заточки своя (рис. 3.8, в). Диаметр  $d$  перехода от угла  $32^\circ$  к углам  $60^\circ$  и  $90^\circ$  рассчитывается по формуле

$$d = \sqrt{\frac{I}{20\pi}}, \text{ мм.} \quad (3.7)$$

Диаметр отверстия сопла, при котором обеспечивается наиболее качественная сварка, определяется по формуле (3.3), длина линейной части сопла – по формуле (3.4).

При  $d_c > 1,4$  мм расход аргона равен

$$G_{Ar} = 0,022d_c, \text{ г/с.} \quad (3.8)$$

Точность формул в проверенном диапазоне токов от 20 до 140 А составляет  $\pm 10\%$ .

Токоперенос от вольфрамового стержня (катода) к дуге осуществляется за счет термоэлектронной эмиссии электронов. Для снижения работы выхода электронов в вольфрам вводят легирующие присадки, например, окись лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ). Вольфрам имеет поликристаллическую структуру, и окись лантана располагается в теле вольфрама между кристаллами. При

горении дуги  $\text{La}_2\text{O}_3$  диффундирует из вольфрама к дуге (в сторону большей температуры). Постепенно вольфрам обедняется активатором, работа выхода увеличивается, растет температура вольфрама под пятном дуги и соответственно увеличивается эрозия электрода.

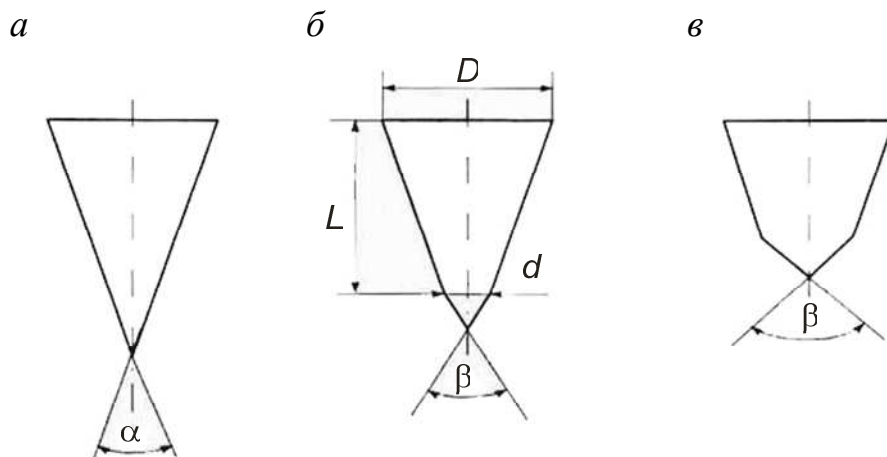


Рис. 3.8. Формы заточки и геометрия вольфрамового анода [7]:

*a* – острая заточка; *б* – заточка для токов 30...80 А; *в* – заточка для токов 60...150 А

На рис. 3.9 представлены три характерных профиля осевого распределения температуры лантанированного вольфрама при различной токовой нагрузке ( $l_c = 20$  мм,  $d_c = 5$  мм, газ – аргон). При небольших значениях тока основная масса вольфрама имеет относительно низкую температуру, кроме участка, находящегося вблизи контакта вольфрама с дугой: здесь наблюдается наибольший градиент температуры и происходит быстрое обеднение легирующей добавки в тонком поверхностном слое электрода (менее чем за 10 мин ее концентрация на рабочем торце падает на несколько порядков (сплошная линия на рис. 3.10)).

Это объясняется тем, что отсутствует эффективная подпитка активной зоны электрода присадкой из более удаленных областей. В данном случае диффузионный приток к рабочему торцу осуществляется лишь из тонкого слоя толщиной 2...3 мм, так как в других частях катода температура меньше температуры подвижной присадки  $T_{пв}$  (температура, ниже которой диффузия частиц активатора практически прекращается). Для большинства активаторов  $T_{пв}$  лежит в пределах 1500...1700 К.

В диапазоне рабочих токов 350...400 А профиль температуры катода выравнивается (штриховая линия на рис. 3.9), наблюдается достаточно равномерный прогрев массива электрода до температур больше  $T_{пв}$  присадки. Это оптимальный режим, так как достигается наиболее эффективная



компенсация ухода присадки с рабочей поверхности за счет ее диффузии из более отдаленных частей электрода и концентрация активатора в течение длительного времени сохраняется на достаточно высоком уровне (штриховая линия на рис. 3.10).

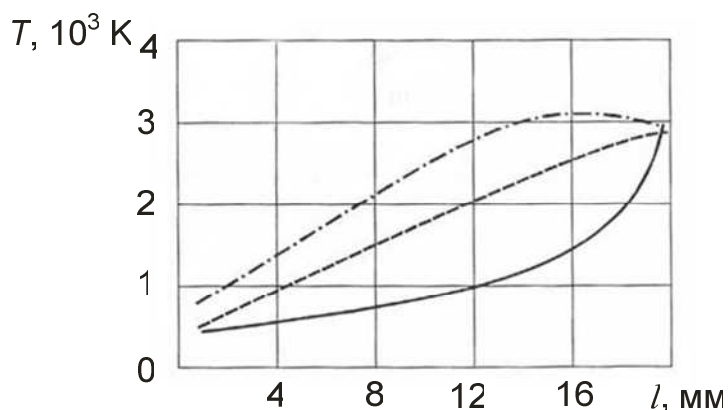


Рис. 3.9. Осевые распределения температуры катода [7]:

— — 100 А; — — — 350 А; — · — · — 600 А

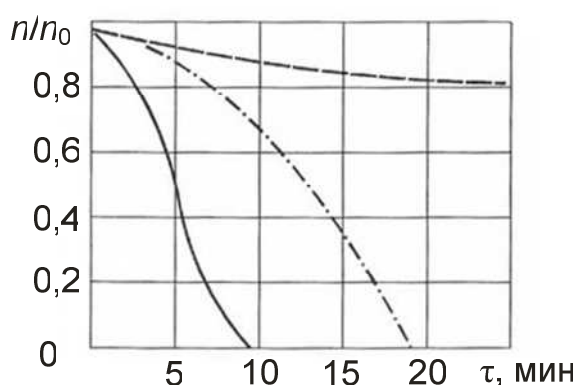


Рис. 3.10. Динамика выхода активатора на рабочем торце катода [7]:

$n/n_0$  — относительная концентрация  $\text{La}_2\text{O}_3$ ;

— — 100 А; — — — 350 А; — · — · — 600 А

При больших токах средний уровень температуры катода резко повышается, профиль температуры приобретает немонотонный характер (штрихпунктирная линия на рис. 3.10). Высокий уровень температуры в теле катода, а также наличие максимума в осевом распределении температуры вызывают после 15 мин работы резкое обеднение присадкой рабочей поверхности. Часть материала присадки испаряется с боковой поверхности электрода, никак не влияя на перенос тока. Температура рабочей поверхно-

сти катода увеличивается, возрастает испарение катода, за счет рециклинга на острие катода образуются «усы». Как уже ранее отмечалось, в микроплазмотронах это ведет к шунтированию дуги в промежутках «катод – сопло» и «сопло – изделие» и преждевременному выходу плазмотрона из строя.

Если рассчитать температурный режим работы катода для различных длин, диаметров электрода и токов дуги, то можно получить набор кривых, близких к оптимальной кривой (штриховая линия на рис. 3.9). Каждому диаметру будет соответствовать оптимальное значение тока. Затем полученные численные данные с учетом результатов экспериментов можно обобщить и получить приближенную формулу (3.2), связывающую ток дуги и диаметр электрода.

Исследования эрозии составного медно-вольфрамового анода показали, что величина его удельной эрозии падает с уменьшением тока (рис. 3.11). Быстрое падение величины эрозии объясняется тем, что в отличие от катода анод является коллектором, а не эмиттером электронов, и для его работы не нужна высокая температура. Поэтому с уменьшением тока снижается тепловой поток в электрод, падает температура рабочей поверхности вольфрама и вместе с ней экспоненциально снижается его испарение. Кривая *б* снята при меньшей длине вольфрама ( $L = 3,7$  мм), чем кривая *а* ( $L = 4,5$  мм) (см. рис. 3.11). Поэтому его тепловое сопротивление меньше, ниже температура рабочей поверхности и удельная эрозия при равных токах заметно снизилась.

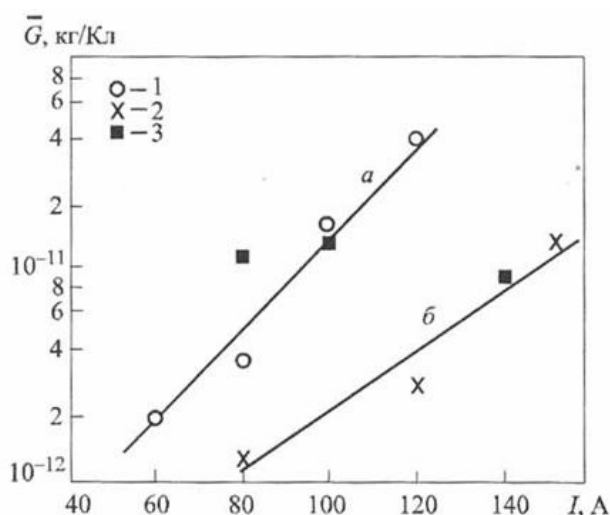


Рис. 3.11. Зависимость удельной эрозии составного медно-вольфрамового электрода от тока [7]:

анод: 1 –  $d = 3$  мм; 2 –  $d = 4$  мм; катод: 3 –  $d = 4$  мм

Как уже упоминалось, составной электрод может использоваться также в качестве катода. На рис. 3.11 точки 3 соответствуют зависимости удельной эрозии катода от тока того же самого электрода, который в предыдущих экспериментах (кривая б) служил анодом. Сравнение значений  $\overline{G}$  катода и анода показывает, что при правильном выборе геометрии заточки вольфрама и токовой нагрузки ресурс анода выше, чем катода. Поэтому составные аноды могут успешно применяться для сварки в автоматическом режиме. Экспоненциальный характер изменения эрозии от тока и взаимное расположение кривых *a* и *б* (см. рис. 3.11) показывают, что при токах 60...150 А ресурс непрерывной работы анода может составить не менее 100 ч.

На базе составного медно-вольфрамового (Cu-W) анода кроме плазмотронов для сварки тонкостенных листов металла можно создать плазмотроны с более высокой токовой нагрузкой, увеличив диаметр *D* вольфрамового стержня и проходные сечения водяных каналов охлаждения электродного узла. Здесь возникают важные для практики вопросы: до какого тока можно нагружать электрод без его интенсивного разрушения и как предельный ток зависит от исходного диаметра вольфрама *D*, угла заточки  $\alpha$  и параметра *d* (см. рис. 3.8). Ответить на эти вопросы можно расчетным путем, а экспериментальные данные используются для контроля и корректировки результатов расчета. Расчетная схема электрода представлена на рис. 3.12 (для упрощения задачи коническая площадка контакта вольфрама с дугой здесь заменена на плоскую с радиусом  $r_{\text{п}} = d/2$ ).

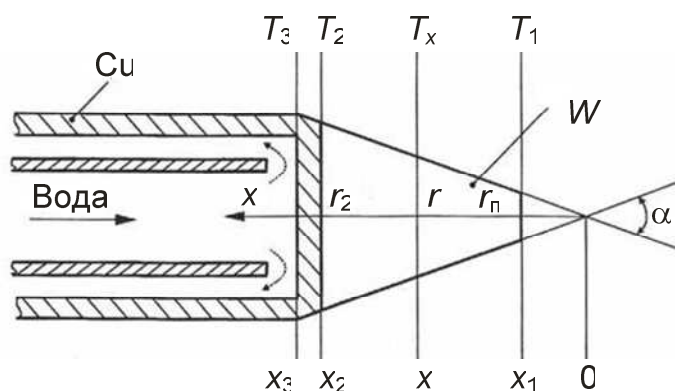


Рис. 3.12. Расчетная схема вольфрамового анода [7]:

*r* – текущий радиус;  $r_{\text{п}}$  – радиус рабочей площадки;  $r_2$  – радиус контактной поверхности вольфрама с медью;  $x_1, x, x_2, x_3$  – сечение электрода;  $T_1, T_x, T_2, T_3$  – соответствующие температуры

Оценки показывают, что для электрода данной формы энергия излучения с боковой поверхности вольфрама близка по величине к энергии, выделяемой в вольфраме за счет джоулева нагрева, и они компенсируют друг друга [7]. Поэтому, пренебрегая джоулевым выделением тепла, теплоотдачей к аргону и излучением, можно предполагать, что тепловой поток  $Q = IU_э$ , поступающий от дуги в электрод, остается неизменным при любом его сечении  $x$ . В этом случае уравнение теплопроводности имеет вид  $Q = \lambda S \frac{dT}{dx}$ , где  $S$  – площадь сечения электрода.

Так как  $S = \pi r^2 = \pi x^2 \operatorname{tg}^2(\alpha/2)$ , то получим

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Q}{\pi \left( x^2 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \right)}. \quad (3.9)$$

При этом граничные условия будут  $T_{x_3} = T_3$ ,  $T_{x_1} = T_1$ .

Далее получаем:

$$T_1 = T_2 + Q (1/x_1 - 1/x_2) \lambda_w \pi \operatorname{tg}^2(\alpha/2), \quad (3.10)$$

$$T_2 = T_3 + Q (1/x_2 - 1/x_3) \lambda_{Cu} \pi \operatorname{tg}^2(\alpha/2), \quad (3.11)$$

где  $\lambda_w, \lambda_{Cu}$  – средние значения теплопроводности вольфрама и меди.

В качестве граничных максимальных температур поверхности вольфрама со стороны дуги примем  $T_1 = 3000$  К, а с охлаждаемой –  $T_3 = 373$  К. Последнее условие связано с недопустимостью парообразования в полости электрода.

Уравнения (3.10) и (3.11), дополненные соотношением  $Q = IU_э$ ,  $U_э = 6,15$  В ( $U_э$  – вольтов эквивалент теплового потока – определен экспериментально), и параметры  $r_n = d/2$ ;  $x_1 = r_n / \operatorname{tg}(\alpha/2)$ ;  $x_2 = r_2 / \operatorname{tg}(\alpha/2)$ ;  $x_3 = x_2 + 2 \cdot 10^{-3}$  м позволяют для электрода с заданными значениями диаметра  $D$ , угла заточки  $\alpha$  и параметра  $d$  определить предельный ток  $I_{пр}$ , при котором температура рабочей поверхности не превышает 3000 К. По мере выхода активирующей добавки тепловой поток в анод возрастает и увеличивается  $U_э$ . Например,  $U_э$  может быть равной 8 В, что приведет к снижению  $I_{пр}$ . Таким образом, используемое понятие – *предельный ток* – величина условная.

Данные расчетов для различных значений параметров  $D$ ,  $d$ ,  $\alpha$  при  $U_3 = 6,15$  В обобщаются в виде

$$I_{\text{пр}} = 6,92d^{1,8}D^{-0,66}\alpha^{0,6}, \quad (3.12)$$

а для  $U_3 = 8$  В они имеют вид

$$I_{\text{пр}} = 4,84d^{1,8}D^{-0,66}\alpha^{0,6}. \quad (3.13)$$

Здесь угол  $\alpha$  измеряется в градусах, диаметры  $D$  и  $d$  – в миллиметрах, ток – в амперах. Формула получена для  $D = 5 \dots 10$  мм,  $d = 1 \dots 9$  мм,  $\alpha = 20 \dots 50^\circ$ .

На рис. 3.13 представлены рассчитанные по формулам (3.12) (кривая 1) и (3.13) (кривая 2) зависимости предельной токовой нагрузки от диаметра заточки  $d$  для анода, используемого в плазмотроне ( $D = 5$  мм,  $\alpha = 32^\circ$ ). Кривые делят  $d$ - $I$ -пространство на две зоны: зону А, где  $T_1 < 3000$  К, и зону Б, где  $T_2 > 3000$  К. В зоне А электрод может работать достаточно долго в зависимости от выбранного тока. В этой зоне чем меньше ток, тем ниже эрозия электрода и тем выше его ресурс. При выборе токовой нагрузки следует ориентироваться на кривую 2.

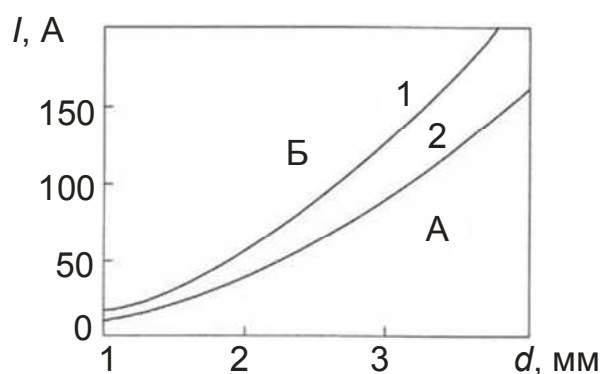


Рис. 3.13. Зависимость предельной токовой нагрузки медно-вольфрамового анода от диаметра рабочей поверхности анода  $d$  [7]

Формулы (3.12) и (3.13) получены обобщением расчетных данных, и точность их составляет примерно  $\pm 15\%$ . Однако она еще на стадии проектирования плазмотрона позволяет для заданного диапазона тока с достаточной для практики точностью рассчитать основные геометрические размеры электрода ( $D$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ), обеспечивающие его максимальный ресурс.

Среди других конструкций выделим плазмотроны для плазменной сварки плавящимся электродом (принципиальная схема – на рис. 3.14),

предназначенные для автоматической плазменной сварки и наплавки на токе прямой или обратной полярности с токоведущей или обесточенной присадочной проволокой. Сфера применения – сварка и наплавка легированных сталей, алюминиевых, титановых, медных, сложнолегированных сплавов. По данным разработчика (кафедра сварочных технологий ПНИПУ), такой плазмотрон обеспечивает высокую производительность сварки: от 15 до 20 м/ч при сварке обесточенной проволокой и до 200–300 м/ч при сварке электродной проволокой со струйным и пароструйным переносом. Специфика работы такого плазмотрона заключается в использовании трех газовых потоков (плазмообразующего, стабилизирующего и защитного), что значительно повышает стабильность процесса и качество сварки. Для питания сжатой дуги, работающей на токах до 200 А, используются сварочные источники питания постоянного тока с падающей внешней характеристикой, для питания дуги плавящегося электрода (МИГ-дуги) – источники питания с жесткой внешней характеристикой (токи до 300 А).

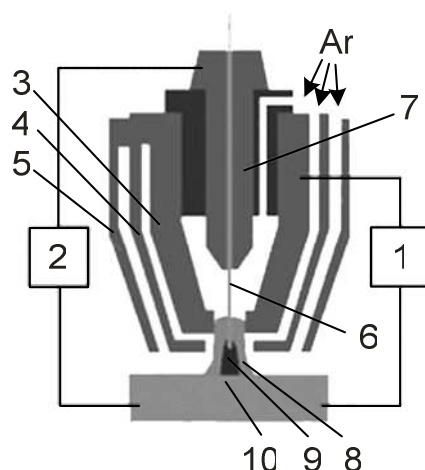


Рис. 3.14. Плазмотрон для сварки плавящимся электродом:

1 – источник питания сжатой дуги; 2 – источник питания МИГ-дуги; 3 – неплавящийся электрод; 4 – стабилизирующее сопло; 5 – защитное сопло; 6 – плавящийся электрод; 7 – токоподвод; 8 – сжатая дуга; 9 – МИГ-дуга; 10 – изделие

Следует отметить, что помимо плазмотронов постоянного тока в сварочных процессах применяются и плазмотроны переменного тока. При работе таких плазмотронов прохождение тока через нуль может вызвать погасание дуги, поэтому напряжение холостого хода источника питания переменным током не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги. Плазмотроны переменного тока рекомендуется применять для сварки

алюминиевых сплавов, так как в периоды обратной полярности за счет действия эффекта катодного распыления разрушается тугоплавкая окисная пленка, препятствующая процессу сплавления металла. Такие плазмотроны могут питаться от однофазного трансформатора либо по схеме вентильной коммутации тока, когда электрод функционирует только как катод (в полупериод прямой полярности), а сопло – как анод (в полупериод обратной полярности). Во втором случае обеспечивается большая стойкость вольфрамового электрода. Применение такой схемы должно быть оптимизировано по токовой нагрузке, так как увеличение тока приводит к ухудшению условий работы сопла, а снижение тока ниже 150 А нарушает стабильность горения дуги. Более стабильное горение дуги достигается при трехфазной схеме питания, однако при этом существенно усложняются конструкция плазмотрона, а также условия работы его электродов и сопла. Иногда для улучшения стабильности горения дуги переменного тока целесообразно применение комбинированной схемы питания плазмотрона.

## **4. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ**

### **4.1. Системные принципы в решении задач экологической безопасности плазменными методами**

Рассмотренная ранее структурно-функциональная схема материально-энергетических процессов (см. рис. 2.2) позволяет представить иерархию субъект-объектных отношений факторов и инструментов безопасности в электроплазменных процессах с точки зрения системного подхода (рис. 4.1). Интегральным элементом данной иерархической системы является плазмотрон, имеющий за счет тепловой и кинетической энергии плазменной дуги (струи) возможность высокотемпературного воздействия на материалы в процессах экологических производств, но требующий, по той же причине, соблюдения норм безопасности по широкому спектру сопутствующих вредных и опасных факторов. В первом случае электроплазменные технологии выступают в качестве инструмента обеспечения экологической безопасности, занимая важное место в широком ряду характерных для плазменного применения высокотемпературных технологий. Второй аспект комплексного изучения «взаимоотношений» ЭПТ и проблемы безопасности – это рассмотрение в процессе проектирования таких технологий плазмотрона в качестве фактора, существенно влияющего на безопасность труда. Основные задачи, которые необходимо решать в этом случае, были рассмотрены нами в других работах [27, 28]. Здесь же остановимся на системных принципах и методах проектирования экологических технологий с использованием плазмотронов [7, 68].

Рассмотрение плазменных технологий как субъекта (инструмент) обеспечения норм экологической безопасности открывает широкую палитру возможностей их применения в производствах экологической направленности (см. рис. 4.1). К настоящему времени разработано большое число методов и способов утилизации отходов любых видов: биологических, термических, химических, механических и смешанных. Основным достоинством плазменных технологий (по сравнению с физико-химическими и биологическими) является универсальность, т. е. возможность подвергать переработке практически любые отходы: твердые, растворимые,



жидкие и газообразные. В основе таких технологий лежит контактная или бесконтактная обработка утилизируемого вещества высокотемпературным теплоносителем, в зависимости от свойств которого технологии можно разделить на плазмохимические, пиролизные, окислительно-огневые, газификационные, паротермические и т. д. Другим преимуществом плазменных технологий является то, что обезвреживание происходит в окислительной или восстановительной среде с подачей воздуха, кислорода и других газов, за счет чего возникает возможность регулирования параметров среды с целью эффективного воздействия на конкретные утилизируемые вещества (диоксины, пестициды и т. д.).

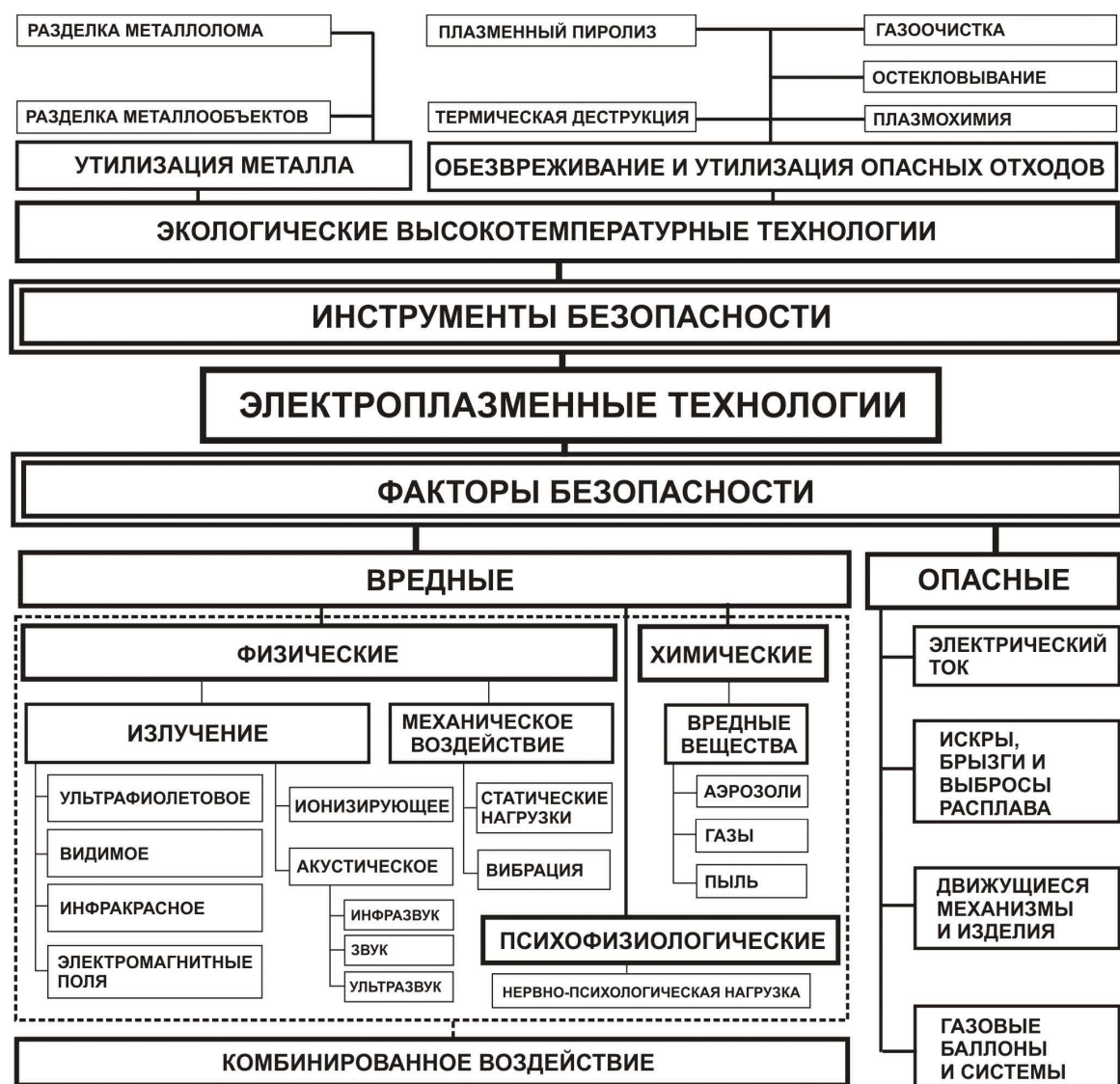


Рис. 4.1. Факторы и инструменты безопасности  
в электроплазменных технологиях

Полный технологический цикл термической утилизации, как правило, состоит из нескольких этапов:

- 1) предварительный этап, который может включать в себя сбор, сортировку, реагентную обработку отходов и даже низкотемпературное воздействие на них для получения необходимых для высокотемпературной переработки характеристик;
- 2) высокотемпературная обработка и обезвреживание;
- 3) многоступенчатая очистка газов;
- 4) вторичное использование продуктов переработки (тепла, синтез-газа, минеральных солей, строительных смесей и т. д.).

## **4.2. Принципы и методы проектирования плазмотронов для обезвреживания отходов**

Для обеспечения эффективного функционирования плазмотронов в технологиях обезвреживания отходов (экотехнологиях) к настоящему времени разработано большое количество их конструкций и схем применения. На рис. 4.2 представлена обобщенная схема признаков классификации плазмотронов по функциональным и конструктивным критериям. Отметим, что в данной схеме присутствуют только признаки, специфичные для применения плазмотронов в экотехнологиях, и оставлены за рамками рассмотренные ранее критерии, общие для плазмотронов различных функциональных классов (см. рис. 2.1).

В соответствии со спецификой фазового состояния подлежащих обезвреживанию и утилизации отходов плазмотроны можно разделить на устройства по переработке дисперсных, парогазовых и конденсированных сред. В первых двух случаях отходы, как правило, подаются непосредственно в плазменную дугу (струю), а обезвреживание конденсированных (твердых и жидких) отходов осуществляется путем внешнего струйного воздействия. Обезвреживание дисперсных токсичных материалов по своей специфике однотипно технологиям плазмохимической переработки и напыления порошкообразных покрытий [69] и, соответственно, существенным образом зависит от теплофизических свойств нагреваемого материала и плазмообразующей среды, гранулометрического состава, способа ввода (инъекции) порошка в плазменную струю, газодинамики плазменного потока. Специфика плазменного обезвреживания подразумевает нагрев дисперсных частиц до температур, обеспечивающих химические реакции их перехода в нетоксичное состояние, что означает необязательность их фазового превращения (плавления

и газификации). Для эффективного нагрева таких частиц необходимо, как правило, обеспечить их предварительную подготовку, подразумевающую диспергирование материала до минимально возможного гранулометрического состояния (обычно менее 500 мкм) и, в случае необходимости, сушку, с последующей дозацией требуемого количества материала в струю. Несмотря на большое количество исследований, посвященных этим процессам, проектирование соответствующей технологии представляет в настоящий момент наибольшую трудность, так как требует предварительного математического моделирования процессов нагрева частиц, специфичных для различных отходов, а также обеспечения эффективного функционирования всех стадий технологии – подготовки порошка, его инъекции, нагрева и утилизации конечных продуктов переработки.



Рис. 4.2. Функциональные и конструктивные признаки классификации плазмотронов для экотехнологий

Известно, что математическая модель для струйно-плазменного процесса обработки дисперсного материала должна представлять собой систему уравнений, отражающих смешение реагентов, теплообмен, фазовые переходы в исходном сырье, химические реакции и процессы формирования целевого продукта (конденсация, коагуляция, кристаллизация) с возможным наложением обратных химических реакций, причем практически все эти стадии совмещены. Сложность моделирования процессов взаимодействия дисперсного вещества с газовой фазой заключается также в том, что соответствующие этим процессам уравнения чувствительны к изменению размера частиц, температур и скоростей фазовых реакций и, следовательно, необходима непрерывная коррекция их структуры или введение уточняющих поправок. С учетом данных трудностей при моделировании таких процессов обычно опираются на два основных подхода, основанных на различных представлениях об определяющей роли отдельных стадий и различном уровне и объеме допущений, принимаемых при математическом описании. В первом случае упрощают представления о механизме взаимодействия частиц с газовым потоком при строгом пространственно-временном учете эволюции параметров газовой и дисперсной фаз, во втором – детально описывают процесс взаимодействия отдельной частицы с нагретым газом без учета динамики всей системы в целом. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с выделением наиболее существенных факторов процесса (структура струи, размеры и конфигурация рабочей зоны, наличие возмущений в потоке, способ ввода сырья и т. д.), требующих учета при аппаратурно-технологическом проектировании, а также с исследованиями конкретного процесса, оптимизацией его режимов для разработки систем автоматического управления.

Наибольшее распространение в технологиях нагрева порошкообразных материалов получили плазмотроны постоянного тока со стабилизацией дуги стенками канала [68]. В основном это плазмогенераторы с самоуставляющейся длиной дуги, которыми оснащены серийные установки Plasmatechnik, Snecma (Швейцария), Plasmadyne, Metco, TAFA (США) и т. д. Как отмечают В. В. Кудинов и Г. В. Бобров, при плазменном нагреве дисперсных материалов возможна как радиальная, так и осевая подача порошка в струи различного вида: турбулентные, ламинарные, до- и сверхзвуковые, закрученные и незакрученные, осе- и плоскосимметричные, непрерывные и импульсные и т. д. [69]. Из-за проблем с подачей порошка

в ламинарный поток, как правило, используются турбулентные струи с невысоким КПД нагрева порошкообразных частиц ( $0,01 \div 0,15$ ), который, в свою очередь, зависит от теплового КПД плазмотрона (эффективности преобразования мощности дуги в тепловую мощность струи). Для повышения КПД необходимо обеспечить максимальное значение напряженности и длины столба дуги, что достигается применением схем с фиксированной и самоустанавливающейся длиной (в случае использования дуговых плазмотронов).

Преимущественной схемой инъекции дисперсных материалов является радиальная, с введением порошка в плазменную струю непосредственно в сопло или на уровне и ниже среза сопла (для высокоэнтальпийных струй). Наиболее эффективна доанодная подача в столб дуги, когда порошок вводится в сопло выше анодного (катодного) пятна. Осевая подача в дуговых плазмотронах затруднена и широкого распространения этот метод не получил.

Как уже отмечалось, процесс нагрева порошков в плазменной струе характеризуется большим количеством параметров. В своей работе «Нанесение покрытий напылением. Теория, технологии, оборудование» В. В. Кудинов и Г. В. Бобров выделяют несколько групп таких параметров и анализируют степень их влияния на эффективность процесса (рис. 4.3) [69]. Представленные конструктивные характеристики существенным образом определяют и газодинамические, и энергетические параметры эффективности нагрева частиц. При увеличении диаметра сопла  $d_c$  снижается скорость плазменной струи  $V_{пс}$  и нагреваемых частиц  $V_ч$ , но за счет увеличения времени нагрева растет температура частиц  $T_ч$  (рис. 4.4).

Для повышения теплового КПД плазмотрона, а следовательно и КПД нагрева частиц целесообразно минимизировать длину канала сопла  $l_d$ , выбирая ее в пределах длины участка привязки анодного пятна  $l_c$  ( $l_d \leq l_c$ ). При минимальной длине сопла анодное пятно, как правило, фиксируется на торце сопла. Однако для повышения теплового КПД необходимо максимально увеличивать длину дуги, из-за чего сопла таких плазмотронов изготавливают удлиненными ( $l_c = (2 \div 3)d_c$  для самоустанавливающихся и  $l_c = (5 \div 10)d_c$  для фиксированных дуг). Кроме того, что фиксация длины дуги позволяет повысить ее температуру и напряженность, эффективность нагрева частиц в этом случае оказывается выше за счет устранения характерного для самоустанавливающихся дуг низкочастотных пульсаций частотой  $10 \div 100$  кГц.

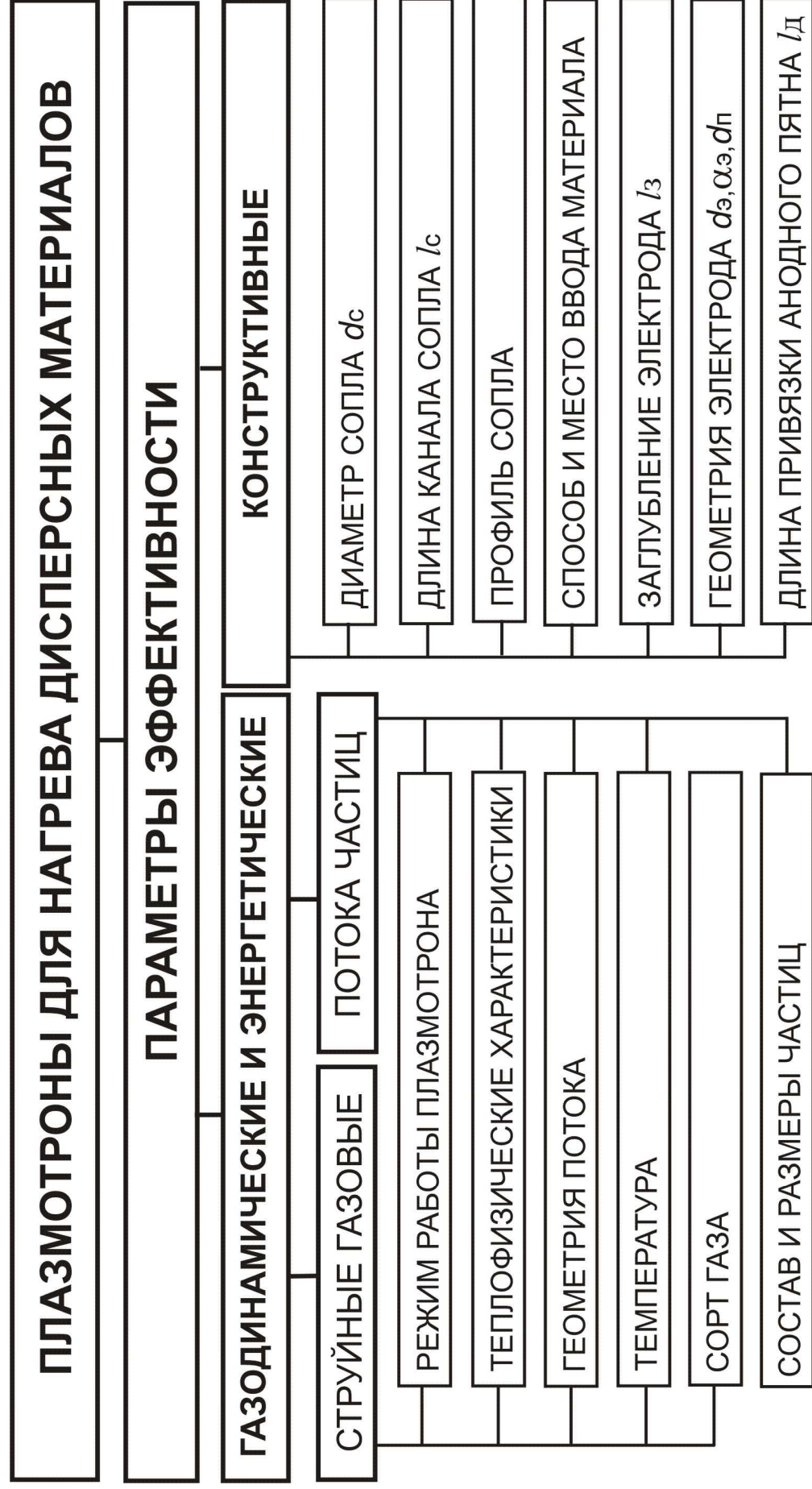


Рис. 4.3. Параметры оценки эффективности плазменного нагрева дисперсных материалов



Этот эффект обусловлен шунтированием горячего осевого ядра электрической дуги и связан с наличием тангенциальной составляющей скорости потока газа, что и приводит к сокращению длины дуги и ее температуры в момент пульсации. Существенное влияние оказывает и профилирование сопла: позволяет изменить скорость струи, тепловой КПД плазмотрона (снижается при малых значениях заглубления электрода  $l_3$ ) и определяет характер его шумоизлучения (при высоких скоростях истечения) [28].

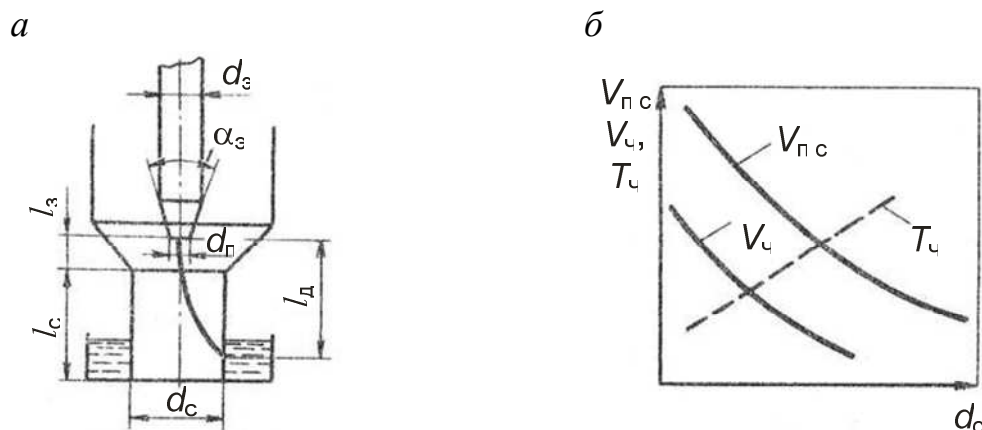


Рис. 4.4. Плазмотрон для нагрева дисперсных материалов [69]:  
 а – конструктивные параметры соплового узла; б – влияние диаметра сопла  $d_c$  на скорость плазменной струи  $V_{\text{пс}}$ , частиц  $V_{\text{ч}}$  и температуру их нагрева  $T_{\text{ч}}$

Согласно результатам исследований влияния конфигурации сопла-анода на характеристики струи, возможно применение трех схем выходных электродов: цилиндрической, диффузорной (с углом раскрытия  $10^\circ$ ) и уступной (рис. 4.5) [41].

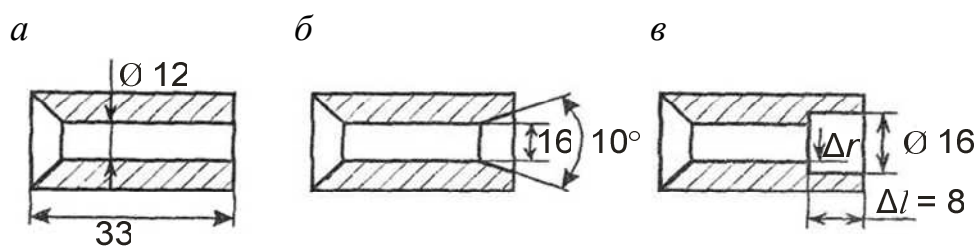


Рис. 4.5. Геометрия выходных сопел [41]:  
 а – цилиндрическая; б – диффузорная; в – уступная

Специалисты отмечают, что предпочтительной является уступная схема с соотношением  $\Delta l / \Delta r \leq 5$ , при которой отсутствует взаимодействие струи со стенкой канала за уступом из-за притока атмосферного воздуха

в уступную часть сопла, а стабилизация истекающей струи происходит за счет снижения уровня турбулентности потока на его границах при выходе в окружающую среду [41]. Диффузорная схема обеспечивает более высокие значения температур по всему сечению на расстоянии 5 калибров от среза сопла, но способствует существенному рассеянию энергии струи, из-за чего на расстоянии 10 калибров профиль температур становится более равномерным (с более низкими значениями осевых температур), чем в случае применения двух других конфигураций.

В своем исследовании Э. Х. Исакаев отмечает, что известная схема плазмотрона с продольным потоком газа в канале постоянного сечения и самоустанавливающейся длиной дуги имеет существенные недостатки: падающую ВАХ, низкий КПД, неустойчивый режим работы и малую скорость холодного газа на входе в канал разрядного промежутка [70]. Альтернативой может стать конструкция с расширяющимся каналом выходного электрода, в котором дуга горит в ламинарном потоке при большой скорости холодного газа на входе. Оптимальной может считаться конфигурация со степенью расширения канала с прямолинейным углом  $\alpha = 6^\circ$ , обеспечивающая постоянный динамический напор газа или постоянное число Маха по длине канала. Такой плазмотрон работоспособен в широких диапазонах изменения параметров, так как имеет возрастающую ВАХ, более устойчивую дугу и значительный ресурс работы электродов, но длина дуги, оптимальная длина канала, а следовательно и КПД сильно зависят от рода и расхода газа, а также от тока разряда.

Важными факторами, определяющими эффективность нагрева, являются способ и место ввода порошкообразного материала в плазменную струю. Как уже было отмечено, осевая подача частиц конструктивно затруднена и имеет недостатки, связанные с низким ресурсом работы торцевого электрода и анодного узла, из-за чего преимущественно применяется осевой способ ввода частиц в доанодную область, позволяющий получить более высокие значения КПД нагрева и использования порошка, чем при его подаче в область за срезом сопла. Необходимо также обращать внимание на геометрические характеристики электрода (диаметр  $d_z$ , угол заточки  $\alpha_z$ , диаметр притупления  $d_{\text{п}}$ ), определяющие его стойкость. Как правило, в плазмотронах для нагрева дисперсных материалов (плазменных распылителях) применяют торированные или лантанированные вольфрамовые электроды, для которых  $d_z = 4 \div 10$  мм,  $\alpha = 45 \div 60^\circ$ ,  $d_{\text{п}} = 2 \div 3$  мм.



Газодинамические и энергетические параметры, определяющие эффективность нагрева частиц в плазменной струе, существенно зависят от режима работы плазмотрона. Говоря о дуговых плазмотронах, обратим внимание на рассмотренные ранее факторы, от которых зависят скорость и температура плазменной струи и нагреваемых частиц: расход плазмообразующего газа, его давление в сопловом узле, профиль газозвдушного тракта, способ стабилизации дуги и т. д. Спецификой устройств плазменного нагрева является увеличенная длина дуги, что влияет на ее напряжение. Как правило, основной задачей таких устройств является достижение максимальной температуры и энтальпии струи за счет повышения мощности дуги. При этом стараются подобрать режим работы плазмотрона, обеспечивающий максимальное напряжение на дуге (зависит также от расхода ПОГ), с последующей регулировкой мощности путем изменения силы тока. Рост мощности дуги ведет также к росту скорости струи и частиц, что может отрицательно сказаться на эффективности нагрева (зависит от теплофизических свойств газа и частиц), а следовательно, требует оптимизации, в том числе по критериям экономичности и безопасности. Увеличение расхода ПОГ также повышает скорость частиц и при неизменной мощности снижает температуру их нагрева. Очевидно, что эффективность нагрева порошкообразных частиц определяется сочетанием большого числа параметров процесса и для нахождения допустимых параметрических диапазонов требуется предварительное моделирование процесса с последующей экспериментальной оптимизацией.

Требования к плазмообразующим газам в технологиях плазменного обезвреживания, как правило, ограничиваются высокими значениями температур или энтальпии, а также необходимостью учета окислительно-восстановительных свойств струи (активности) по отношению к нагреваемому материалу. Поскольку температурные интервалы фазовых превращений и физико-химических реакций большинства токсичных соединений, обезвреживаемых плазменным способом, находятся в диапазонах менее 3000 К, на выбор сорта ПОГ в большей степени влияют размер нагреваемых частиц и время их пребывания в плазменной струе. С этой точки зрения, допустима работа плазмотронов для обезвреживания на воздухе или азоте с добавками, для повышения тепловой мощности, водорода, аммиака, горючих газов. Для эффективного нагрева частиц их размеры (гранулометрический состав) желательно минимизировать до  $10 \div 200$  мкм и оптимизировать скорость (обыч-

но  $1 \div 5$  м/с) и относительный расход порошка к расходу газа ( $\sim 10\%$ ). Увеличение расхода ПОГ облегчает подачу порошка, однако приводит к смещению потока частиц относительно оси струи, а следовательно, к снижению эффективности их нагрева. Частично данная проблема решается за счет применения многодуговых схем нагрева в плазменном реакторе.

Характерные среднемассовые параметры плазменной струи и потока дисперсного материала составляют: температура струи на срезе сопла –  $(6 \div 25) \cdot 10^3$  К, энтальпия –  $2 \div 20$  Дж/г, скорость струи – до  $1000 \div 1500$  м/с, скорость частиц –  $100 \div 500$  м/с и в пределах начального участка ( $l_{\text{ну}} = (5 \div 10) d_c$  или  $30 \div 60$  мм) могут считаться постоянными. На основном участке струи значение этих параметров начинает снижаться, причем более интенсивно для одно- и менее – для многоатомных (высокоэнтальпийных) газов. Длина участка нагрева  $l_n$  (обычно  $70 \div 300$  мм) в этом случае увеличивается с ростом степени диссоциации многоатомного газа и уменьшается с ростом турбулизации струи (у ламинарных струй  $l_{\text{ну}}$  и  $l_n$  в  $2 \div 3$  раза больше, однако их применение неэффективно из-за низких скоростей потока и трудностей с удержанием частиц в высокотемпературной области струи).

## **5. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

### **5.1. Параметры эффективности в технологиях плазменной резки и сварки**

Эффективность работы спроектированного плазмотрона – один из важнейших принципов его конструирования. Достижение в процессе проектирования планируемых показателей функциональности подразумевает соответствие критериям производительности, надежности, качества и безопасности (рис. 5.1). Решение этой задачи, как уже отмечалось, часто связано с необходимостью применения оптимизационных методов проектирования, поскольку критерии эффективности, как правило, являются противоречивыми по отношению к критериям стоимости и безопасности. Разумеется, в отдельных случаях соблюдением принципа оптимальности проектирования можно пренебречь. Обычно такая возможность возникает в ситуации, когда проектируемый плазмотрон или электроплазменная технология является безальтернативным вариантом достижения определенной технологической цели (например, плазменная утилизация высокотоксичных отходов). Тем не менее, широкий спектр функционально разнообразных плазмотронов и технологий их применения заставляет в каждом случае формулировать свои специфические критерии их эффективного применения.

С нашей точки зрения, ряд таких критериев общеизвестны – это параметры эффективности и качества технологии (см. рис. 5.1), а некоторые (факторы безопасности) требуют к себе более высокого, чем в настоящее время, внимания. Разумеется, ряд параметров, определяющих качество и эффективность плазменного процесса, регламентируются стандартами. Среди таких документов следует, очевидно, упомянуть ГОСТ 14792–80 «Детали и заготовки, вырезаемые кислородной и плазменно-дуговой резкой. Точность, качество поверхности реза» (международный аналог – стандарт ISO 9013:2002 «Thermal cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical product specification and quality tolerances. Ed.2»), регламентирующий качество поверхности реза сочетанием трех показателей: 1) отклонение поверхности реза от перпендикулярности; 2) шероховатость поверхности реза; 3) величина зоны термического влияния. В сварочных технологиях надо ориентироваться на ГОСТ 4.140–85 «Система показателей качества продукции. Оборудование

электросварочное. Номенклатура показателей», определяющий в качестве основных показатели семи групп: 1) назначения; 2) надежности; 3) экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов; 4) технологичности; 5) стандартизации и унификации; 6) патентно-правовые; 7) безопасности. Среди основных параметров качества в данном ГОСТе выделяются наибольшая скорость, удельное энергопотребление и коэффициент полезного действия (некоторые из них представлены на рис. 5.1 как критерии эффективности, характерные для плазменных процессов). Очевидно, что ряд заявленных критериев (энергопотребление или вольт-амперные характеристики; КПД; параметры плазменной струи, определяющие скорость, толщину и ширину реза) могут быть оценены в процессе проектирования плазменного оборудования.

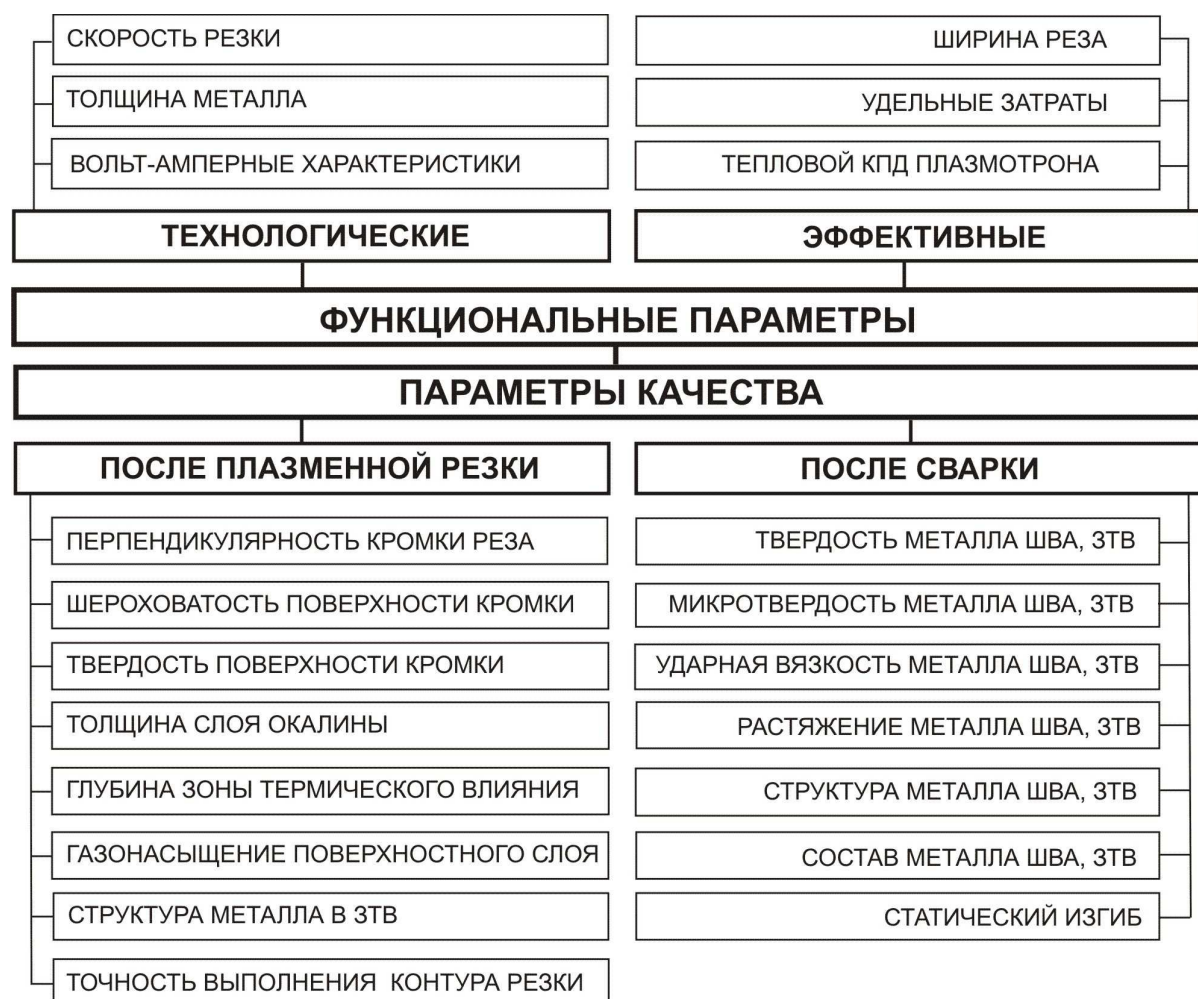


Рис. 5.1. Функциональные и качественные параметры эффективности плазменной резки и сварки: ЗТВ – зона термического влияния

Функциональные параметры плазмотрона, определяющие его производительность, связаны с его конструктивными особенностями и технологическими характеристиками (см. рис. 2.1), а также со свойствами обрабатываемого металла (сорт, марка, толщина и т. д.). Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал позволяет задавать оптимальные технологические режимы плазменного воздействия на материал с учетом конструктивных изменений (как правило, диаметра сопла плазмотрона). Здесь многокритериальной задачей становится, например, выбор скорости резки. На рис. 5.2 представлены области оптимальных режимов резки и пробивки металлов с учетом силы тока, мощности дуги, толщины и сорта металла, диаметра сопла (рисунок выполнен на основе информации, данной в работах Г. И. Лащенко [11] и А. А. Кайдалова [22]). При этом для плазмотронов с воздушным охлаждением подбор диаметра сопла осуществляется следующим образом: 40 А – 1,0–1,1 мм; 60 А – 1,3 мм; 90 А – 1,5–1,8 мм (рис. 5.2 *а, б*).

Следует отметить, что мультипараметрической является и задача определения эффективности плазмотрона по энергетическим критериям. Свидетельством этому служат упомянутые ранее критериальные соотношения (2.1) и (2.2), требующие одновременного учета как конструктивных, так и технологических параметров. При этом большинство газодинамических величин, используемых при расчете (давление, скорость газа), являются трудноопределимыми в режимах реальной работы [7, 8, 16, 18, 55] и зачастую требуют дополнительного расчета с учетом конструктивных особенностей плазмотрона.

Подобная ситуация возникает и в случае оценки надежности работы плазмотрона. Например, во избежание эффекта двойного дугообразования скорость плазмообразующего газа должна соответствовать силе тока и диаметру отверстия сопла. Как правило, силу тока дуги при резке стали толщиной 6–30 мм выбирают в пределах  $270 \pm 30$  А, причем уменьшение силы тока снижает скорость резки, а увеличение ускоряет износ электродов [11]. Важным является экспериментально установленный факт, что увеличение напряжения более эффективно влияет на скорость резки, чем увеличение силы тока [30]. При этом величина напряжения зависит от расхода газа, диаметра и длины канала сопла (степени обжатия дуги) [11]. Это видно на рис. 5.3. На рис. 5.3, *а* показана зависимость указанных параметров при силе тока 350 А, длине канала сопла 6,5 мм; на рис. 5.3, *б* – при силе

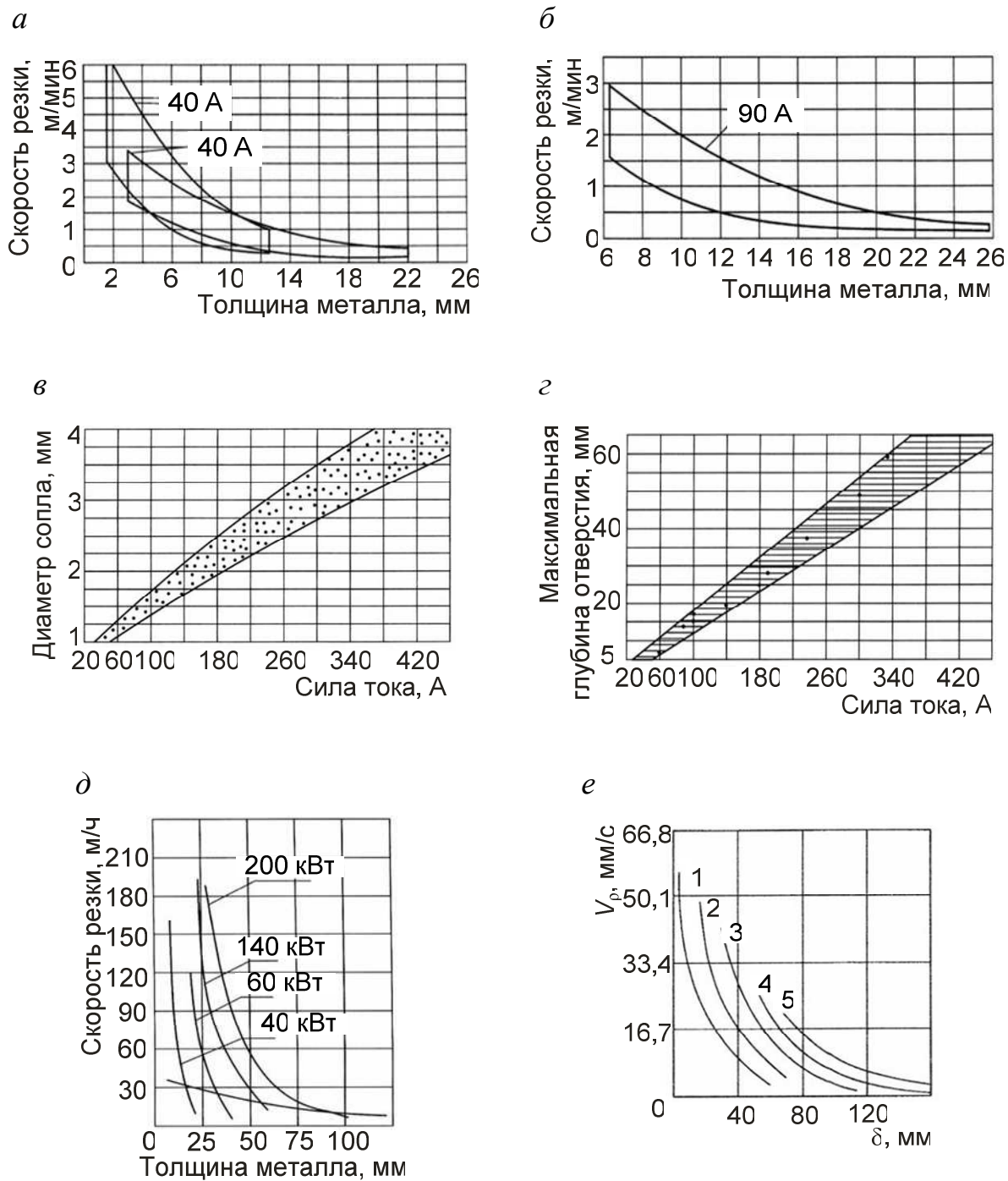


Рис. 5.2. Оптимальные режимы воздушно-плазменной резки и пробивки металлов:

*а, б* – для плазматронов с воздушным охлаждением; *в* – зависимость диаметра сопла от силы тока плазменной струи; *г* – режимы пробивки отверстия; *д* – зависимость скорости резки углеродистой стали от толщины металла и мощности дуги (нижняя линия – скорость углеродной резки); *е* – скорость резки высоколегированной стали плазматроном ПВ-47 при силе тока:  
 1 – 200 А, 2 – 300 А, 3 – 400 А, 4 – 500 А, 5 – 600 А

тока 380 А, углеродистой стали толщиной 65 мм, диаметре сопла 3,5 мм. Увеличение расхода способствует обжатию плазменной дуги, за счет чего уменьшается ширина реза, возрастают скорость резки и напряжение на дуге (мощность). Важное значение имеет также определение оптимального давления, так как давление влияет и на качество реза, и на продолжительность службы электрода и сопла. Повышенное давление затрудняет процесс начала резки и снижает ресурс электрода, а при пониженном недостаточно охлаждается сопло, что также уменьшает продолжительность его работы.

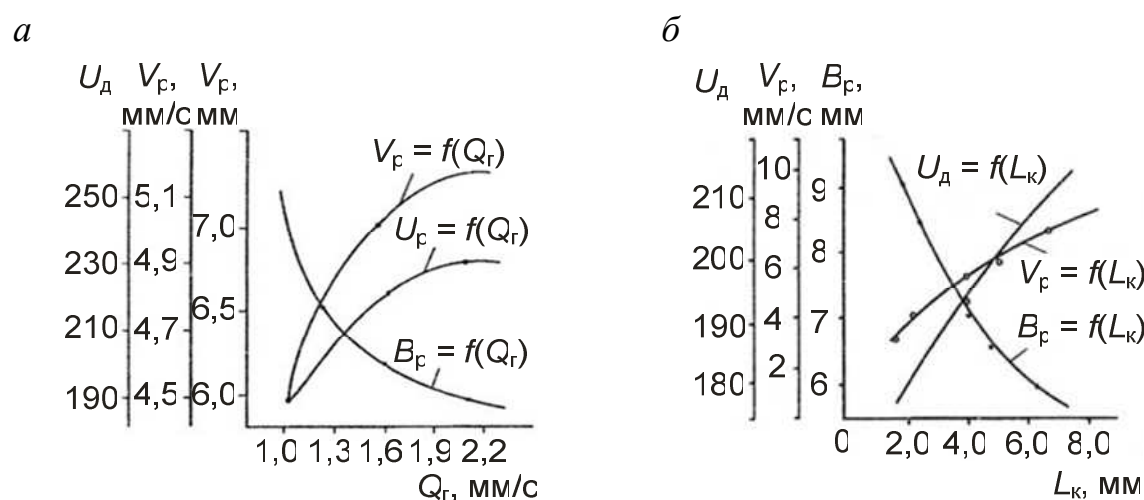


Рис. 5.3. Зависимость напряжения на дуге  $U_d$ , скорости резки  $V_p$ , средней ширины реза  $B_p$ :

$a$  – от расхода воздуха  $Q_r$ ;  $b$  – от длины канала сопла  $L_k$

Увеличение диаметра канала сопла до 6,5 мм приводит к росту эффективности столба плазменной дуги, сохраняя ширину реза примерно одинаковой по верхней и нижней плоскостям листа в пределах 6–6,5 мм [34]. Чрезмерное увеличение длины канала при его оптимальном диаметре снижает тепловой КПД и повышает вероятность двойного дугообразования. Оптимальная длина канала для сопла диаметром 3,5 мм составляет 6–7 мм. Ширина реза, в свою очередь, устанавливается в зависимости от диаметра сопла, силы тока, скорости резки, состава и расхода плазмообразующего газа, расстояния от среза сопла до металла. В первом приближении ширину реза по верхней кромке можно принять равной 1,5 диаметра сопла [22].

Следует заметить, что упомянутые выше стандарты качества были, в основном, разработаны в конце 70-х гг. XX в. после проведения многочисленных исследований процессов плазменно-дуговой сварки и резки. ГОСТ 14792–80 распространяется только на детали и заготовки, вырезаемые плазменной резкой из листовой стали различных типов, алюминия и его сплавов толщиной от 5 до 60 мм.

В нем в том числе обозначены нормы допускаемых отклонений, определяющие качество реза по геометрическим критериям (табл. 5.1 и 5.2).

Таблица 5.1

Допускаемые отклонения размеров деталей от номинальных, мм

Класс точности	Толщина листа, мм	Размер детали или заготовки, мм			
		До 500	Свыше 500 до 1500	Свыше 1500 до 2500	Свыше 2500 до 5000
1	5–30	+1,0	+1,5	+2,0	+2,5
	31–60				
2	5–30	+2,0	+2,5	+3,0	+3,5
	31–60	+2,5	+3,0	+3,5	+4,0
3	5–30	+3,5	+3,5	+4,0	+4,5
	31–60	+4,0	+4,0	+4,5	+5,0

Таблица 5.2

Допускаемые отклонения перпендикулярности реза  
при машинной плазменной резке, мм

Класс точности	Толщина разрезаемого металла, мм		
	5–12	13–30	31–60
1	0,4	0,5	0,7
2	1,0	1,2	1,6
3	2,3	3,0	4,0

Напомним, что под перпендикулярностью понимается разница по ширине реза между верхней и нижней кромками (см. табл. 5.2). Возникновение подобных отклонений обусловлено особенностями термокинетического воздействия плазменной дуги на металл, при котором рез образуется в боль-



шей степени за счет расплавления металла тангенциально закрученным потоком поступательно перемещающегося газа. В результате, как правило, образуется рез со скругленными кромками в верхней части и отклонением от перпендикулярности на одной из стенок. Дополнительным следствием такого воздействия является образование бороздок на поверхности реза. На параллельность кромок существенным образом влияет величина факельного зазора (расстояние от соплового среза до поверхности металла): при его увеличении увеличивается и угол наклона кромки реза. Оптимальным считается зазор от 1,5 до 10 мм. Поддержание такого зазора способно существенно улучшить качество реза и увеличить ресурс сопла и электрода.

Разделка металлов под сварку – одно из основных направлений использования плазменной резки в настоящее время. Поскольку качество сварных швов сильно зависит от состояния поверхности (степени подготовленности), большое внимание уделяется ее шероховатости. Как правило, на поверхности реза образуются штрихи (бороздки), что является следствием непостоянства мгновенной скорости резки. Глубина таких бороздок при плазменной резке значительно меньше, чем при кислородной [11], а неровность поверхности (волнистость), наоборот, меньше. При плазменной резке на скоростях менее 10 мм/с образование бороздок минимально [30]. Нормы на шероховатость поверхности реза согласно ГОСТ 14792–80 для плазменной резки приведены в табл. 5.3. Установлено, что шероховатость поверхности реза  $R_z$  при плазменной резке в оптимальных режимах не выходит за пределы 50 мкм, что соответствует 1-му классу. Снизить шероховатость можно путем применения кислородной резки вместо воздушно-плазменной.

Таблица 5.3

Допускаемая шероховатость поверхности реза, мм

Класс точности	Толщина разрезаемого металла, мм			
	5–12	13–30	31–60	61–100
1	0,050	0,060	0,070	0,085
2	0,100	0,200	0,320	–
3	0,200	0,320	0,630	–

Как правило, перед проведением сварочных работ предварительно разделанных деталей производят механическое удаление поверхностного слоя контактирующих при сварке шовных поверхностей. В этой связи су-

ществленную роль начинают играть такие параметры поверхности, как твердость, наличие грата и окалины, размеры зоны термического влияния, газонасыщение слоя.

Размеры грата при плазменной резке, как правило, меньше, чем при газокислородной при сопоставимых толщинах углеродистой стали, и зависят от большого числа технологических факторов: скорости резки, расхода газа, расстояния от сопла до металла и т. д. [34]. На рис. 5.4 и 5.5 представлены данные, определяющие выбор скоростей плазменной резки, при которых грат минимален. Грат, образующийся при пониженных скоростях резки, легко удаляется с кромок реза, в отличие от грата, характерного для повышенных скоростей. Расход газа, обеспечивающий минимальные размеры грата, составляет 70–80 л/мин.

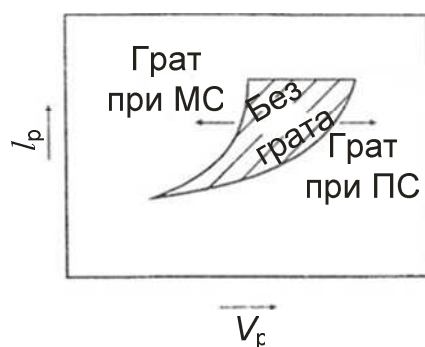
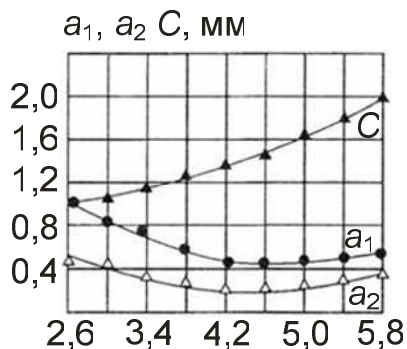


Рис. 5.4. Схема влияния при плазменной резке скорости резки и силы тока на образование грата [71]:

МС – малые скорости, ПС – повышенные скорости

*а*



*б*

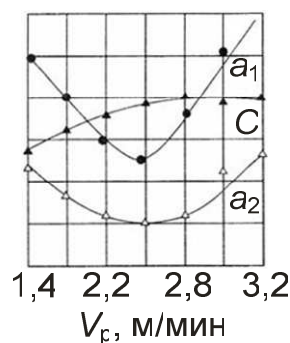


Рис. 5.5. Зависимость размеров грата  $a_1$  и  $a_2$  и неперпендикулярности поверхности реза  $C$  от скорости резки металла [72]:

*а* – толщиной 6 мм; *б* – толщиной 10 мм

В ГОСТ 14792–80 регламентируется ширина ЗТВ (табл. 5.4), которая зависит от рода металла (нормы уменьшаются в два раза для алюминия и в четыре раза при резке аустенитных сталей).

Таблица 5.4

Протяженность зоны термического влияния для среднеуглеродистых сталей, мм

Класс точности	Толщина разрезаемой стали, мм		
	5–12	13–30	31–60
1	0,2	0,4	0,8
2	0,8	1,6	3,2
3	1,6	3,2	6,4

В структуре ЗТВ выделяются два участка: внешний литой слой и примыкающий к нему внутренний, имеющий характерную для зоны перегрева структуру металла с различным ростом зерна по мере уменьшения температуры нагрева в направлении основного металла. Характер и размеры ЗТВ зависят от состава и толщины металла, рабочего тока и скорости резки [34]. На рис. 5.6 видно, что ширина ЗТВ на образцах, вырезанных плазменным способом, существенно ниже, чем при ацетиленокислородной резке, а это обеспечивает улучшение необходимых для сварки поверхностных свойств.

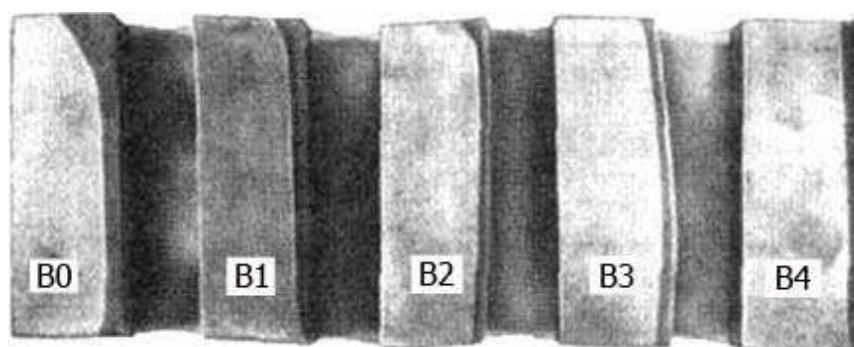


Рис. 5.6. Зона термического влияния для стали толщиной 40 мм [34]:

$B_0$  – ацетиленокислородная резка;  $B_1$  – воздушно-плазменная резка;  
 $B_2$  – воздушно-водяная плазменная резка;  $B_3$  – азотно-плазменная резка;  
 $B_4$  – азотно-водяная плазменная резка

При плазменной резке листов нержавеющей стали толщиной 30 мм образуется ЗТВ незначительной для последующей сварки толщины, а литой слой имеет вид светлой полосы и отличается от других участков сла-

бой травимостью и высокой твердостью. Как правило, такой слой присутствует в кромках углеродистых, низколегированных и среднелегированных сталей. У высоколегированных сталей такого слоя на поверхности кромки не наблюдается. При плазменной резке цветных металлов, в частности меди, в литом слое на кромке, особенно в нижней ее части, в зависимости от условий резки могут образовываться шлаковые включения, рыхлоты, химические соединения в виде закиси меди. Указанные включения и образования, попадая в сварной шов, снижают пластичность и прочность металла. При определенных условиях плазменной резки, обеспечивающих минимальную глубину ЗТВ и литого слоя (высокие скорости резки, напряжение, расход газа, малая сила тока), можно получить кромки резов, свободные от указанных дефектов. В этом случае механическая обработка кромок перед сваркой не требуется.

Данные по структуре ЗТВ и газонасыщению поверхностных слоев при плазменной резке, представленные в работе И. Г. Ширшова и В. Н. Котикова, подтверждают зависимость химической неоднородности металла на поверхности реза от состава плазмообразующей среды [34]. Металлы имеют различное процентное содержание элементов. Состав плазмообразующего газа также может быть различным. Поэтому в процессе резки поверхностный слой может изменить свои свойства за счет насыщения газами (например, азотом), что ухудшит его свариваемость или осложнит механическую обработку. Отмечается, что наибольшие изменения такого характера происходят в литом слое, толщина которого по поверхности листа, как правило, неравномерна. При этом на поверхности реза образуются макрорельеф в виде вертикальных или наклонных к поверхности листа рисок (бороздок), а также зона оплавления.

При воздушно-плазменной резке происходит преимущественное насыщение кромок азотом и кислородом, из которых первый представляет наибольшую опасность. При плазменной резке азот может попадать из плазмообразующей среды (при использовании азота, воздуха или азотсодержащих газовых смесей) либо из окружающего воздуха за счет инжекции в плазменную струю [11, 38, 73]. Поскольку максимальное насыщение азотом наблюдается в литом участке ЗТВ, для уменьшения нитрирования поверхности реза стремятся снизить глубину литого участка путем изменения направления, минимизации скорости резки, повышения напряжения на дуге, применения кислорода в качестве ПОГ (так называемый смыв-процесс) [34].

При плазменной резке низкоуглеродистых, низко- и среднелегированных сталей независимо от плазмообразующей среды всегда происходит газонасыщение поверхности реза, причем это газонасыщение при сварке малых толщин проявляется больше, т. е. образуется большее количество пор. Число пор в сварных швах зависит также от способа и условий сварки. Наименьшее газонасыщение кромок деталей наблюдается при вырезке их кислородной плазмой, использовании воздушно-водяного и кислородно-водяного плазменных способов резки. Происходящее при плазменной резке сталей вследствие больших скоростей нагрева и охлаждения (до 2000 °С вблизи кромки реза) науглероживание поверхности кромки приводит к образованию неравновесной напряженной мартенситной структуры с микротвердостью до 900 Н<sub>20</sub> и более, что может быть чревато микронадрывами и трещинами в поверхностном литом слое.

Приведенные И. Г. Ширшовым и В. Н. Котиковым данные о влиянии состава плазмообразующих сред на характеристики поверхности реза также свидетельствуют о том, что в структуре ЗТВ, как правило, наблюдается потеря легирующих элементов [34], уменьшить которую можно за счет небольших добавок газообразных углеводородов к воздуху – это будет способствовать подавлению реакции окисления. В случае присутствия водорода в окружающей среде происходит ускорение выделения азота и железа (в интервале температур 750–900 °С). Это может быть связано с восстановительным действием водорода, так как пленка окислов на поверхности железа замедляет и поглощение, и десорбцию азота. Отмечается также, что в сравнимых условиях скорость поглощения азота жидким железом и сталью, как и скорость его десорбции, значительно ниже, чем водорода. На основании экспериментальных данных установлено, что численное значение коэффициента скорости массопереноса азота в жидком железе и его сплавах в четыре–шесть раз меньше, чем водорода. В условиях плазменной резки с высокой кинетикой происходящих процессов и с учетом проникающей способности водорода разница в массопереносе азота и водорода должна увеличиться, а соответственно, возрасти влияние водорода на десорбцию азота.

Как отмечает А. А. Кайдалов, проблему повышения качества реза, стабильности дуги, а также скорости резки можно решить путем внедрения нескольких разновидностей процессов плазменно-дуговой резки (рис. 5.7) [22].

При резке с двойным газом (рис. 5.7, *а*) одновременно с плазмообразующим газом подается второй газ, который обдувает сопло. В результате усиливаются сжатие дуги и эффективность выдувания расплава из полости реза. При этом также снижается вероятность двойного дугообразования, уменьшается скругление верхних кромок реза, достигается более высокая скорость реза. В качестве второго газа для стали используется воздух, кислород, азот; для нержавеющей стали – азот, углекислый газ, смесь аргона с водородом; для алюминия – смесь аргона с водородом или азота с углекислым газом.

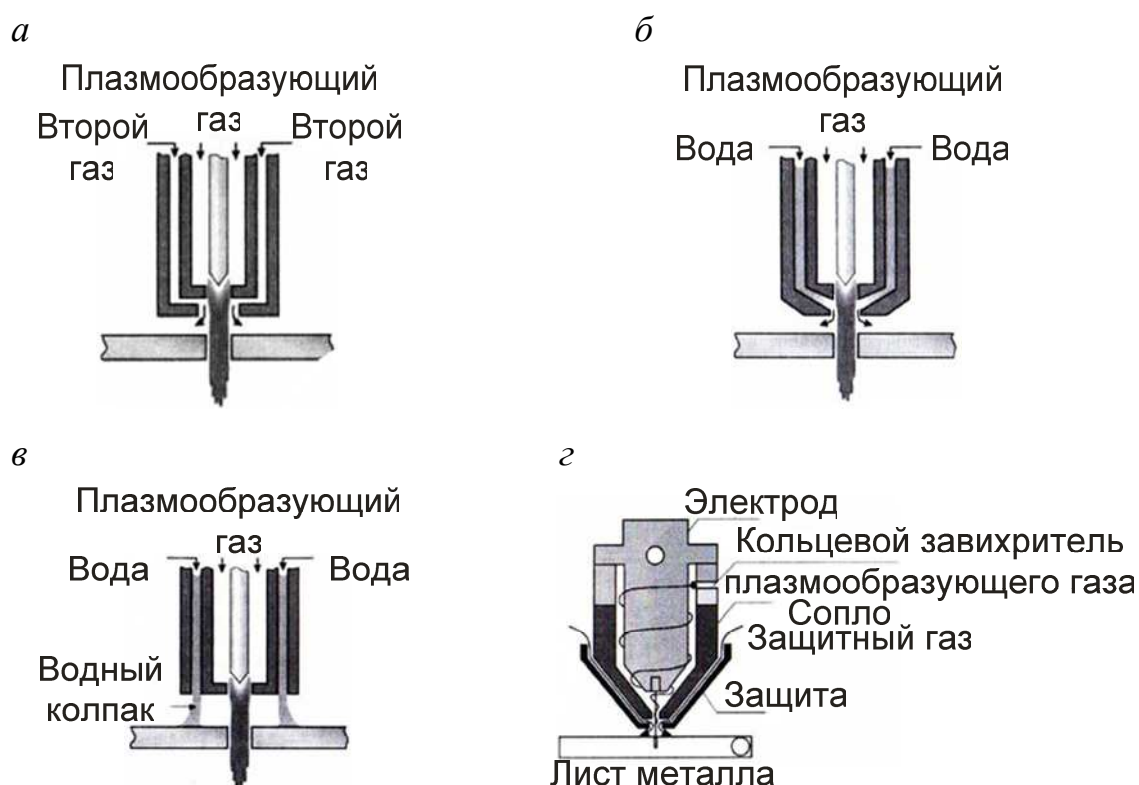


Рис. 5.7. Способы плазменно-дуговой резки с улучшенным качеством реза:

*а* – плазменно-дуговая резка с двойным газом; *б* – плазменно-дуговая водо-инжекционная резка; *в* – плазменно-дуговая резка в водяном колпаке; *г* – резка сжатой плазмой

Технология водо-инжекционной резки предполагает подачу вместо второго газа воды, радиально инжектируемой в дугу азотной плазмы (рис. 5.7, *б*). При этом используется специальное сопло, внутренняя полость которого сопряжена с основным соплом (рис. 5.8) [11]. Это приводит к сжатию дуги и повышению температуры плазмы (до 30 000 °С). Помимо улучшения качества и производительности реза использование данной

технологии дополнительно позволяет уменьшить эрозию сопла. Недостатками данного способа являются сложность возбуждения дуги и быстрый расход применяемых графитовых электродов, что делает процесс недостаточно технологичным и надежным [11].

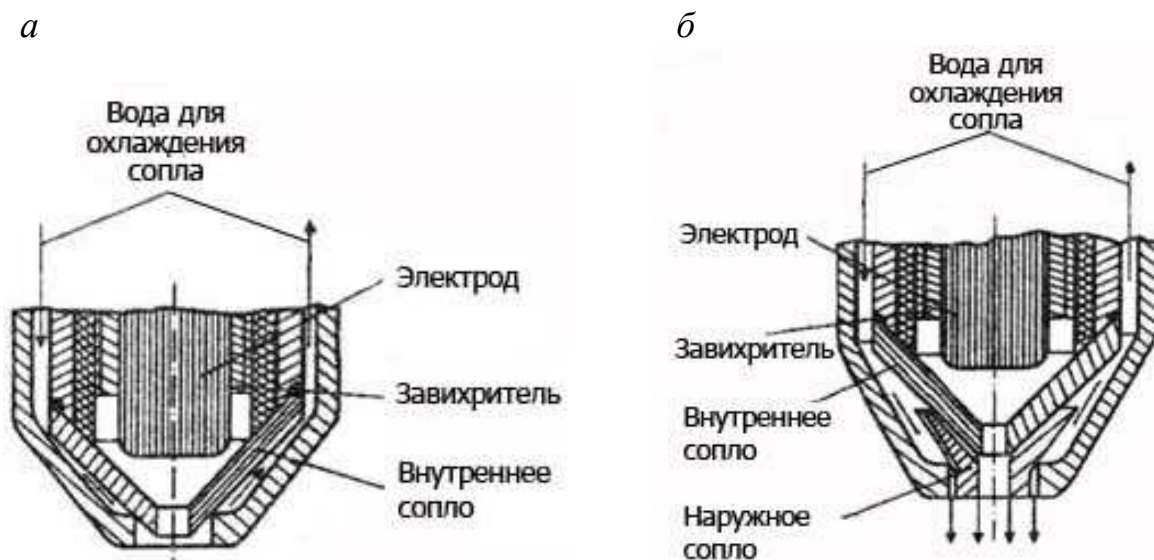


Рис. 5.8. Схема головки плазмотрона:

*а* – для обычной плазменной резки; *б* – для водо-инъекционной резки

Решение задачи эффективного внедрения плазменно-дуговой резки подразумевает обеспечение безопасности процесса. Одним из способов, существенно уменьшающих уровень шума и выделение в пространство рабочей зоны дыма и аэрозолей, является резка в водяном колпаке и под слоем воды. Результаты исследования эффективности такой технологии подробно представлены в работах Г. И. Лашенко [11], И. Г. Ширшова и В. Н. Котикова [34] и др., а санитарно-гигиенический аспект ее внедрения рассмотрен нами в труде «Плазмтроны: проблемы акустической безопасности» [28]. Подобную резку можно осуществлять различными способами: с зазором, касанием и погружением разрезаемого металла в воду, с завесой (водяным колоколом) вокруг плазмтрона и плазменной дуги, с погружением листа и плазмтрона в воду. При всех вариантах происходит поглощение водой вредных примесей, снижается коробление металла, на 10–20 % уменьшается ширина реза, в 2 (при погружении в воду) или в 1,5 (при касании листом воды) раза становится меньше по сравнению с резкой на воздухе глубина ЗТВ. Водяная защита кроме того, что снижает шум на 15–20 дБ, так-

же практически полностью исключает всасывание окружающего воздуха в зону дуги, предотвращая тем самым нитрирование поверхностного слоя реза. Среди недостатков данного способа следует отметить повышенное образование грата на кромках заготовок, из-за чего скорость и производительность процесса оказываются ниже, чем при воздушно-плазменной резке.

Одним из универсальных решений проблем эффективности, качества и безопасности резки является применение технологии сжатой, или узкоструйной, плазмы (рис. 5.7, *з*). Технология позволяет получить высококонцентрированную струю путем закрутки основного плазмообразующего газа перед входом в отверстие сопла и подачи второго газа в струю после ее выхода из сопла для обжата и стабилизации. Как отмечает А. А. Кайдалов, технология резки сжатой плазмой позволяет закрыть значительный с технологической и экономической точки зрения пробел между двумя известными методами резки тонких листов – лазерной и воздушно-плазменной резкой (рис. 5.9, *а*) [22]. Для данной технологии характерны сравнимая с лазерной шероховатость реза, минимальные отклонения от перпендикулярности реза, высокая точность резки контуров с небольшими радиусами, малые глубины ЗТВ, отсутствие или небольшое количество образующегося грата (рис. 5.9, *б*). Дополнительными преимуществами технологии являются повышенная плотность энергии, стабильность электрической дуги, долговечность сменных частей (сопла и электрода), минимальный расход энергии и газа, высокая производительность. Для эффективного ее применения следует придерживаться оптимальных режимов, рекомендуемых производителями (рис. 5.9, *в*).

Как упоминалось ранее, мировыми лидерами в разработке и внедрении технологии узкоструйной плазмы являются компании Kjellberg и Messer Greisheim (Германия), а также HyperTherm (США). Фактор эффективности является одним из важнейших при маркетинговом продвижении любой технологии, поэтому упомянутые фирмы делают особый акцент на рассмотрении преимуществ технологии узкоструйной плазмы. Например, в компании Messer Greisheim рассматривают узкоструйную технологию плазменной резки в сравнении с автогенной и лазерной разделкой, а также резкой обычной воздушной или кислородной плазмой и выделяют ее в качестве наиболее экономичного решения для увеличения точности при разделке тонких листов и листов средней толщины. Помимо упомянутых выше преимуществ данной технологии отмечается малое выделение



тепла при узком резе, за счет чего уменьшаются тепловые деформации, и говорится о том, что применение технологии Longlife позволяет значительно продлить срок службы расходных деталей. (Технология Longlife предназначена для использования на портальных машинах тепловой резки в автоматическом режиме управления с использованием в системе ЧПУ базы данных для задания и установки параметров резки.)

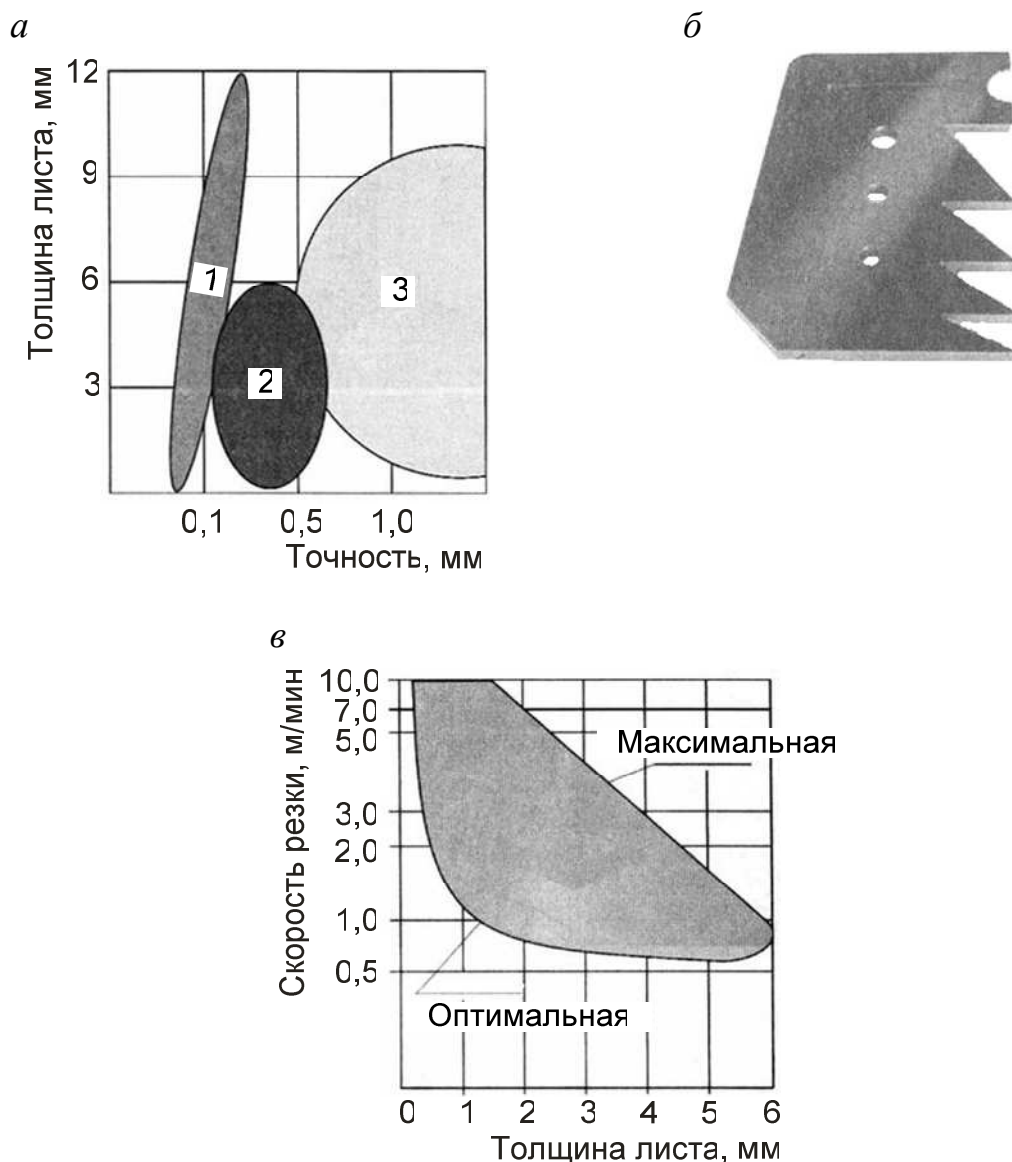


Рис. 5.9. Особенности резки сжатой плазмой:

*a* – зависимость точности резки от толщины листа: 1 – CO<sub>2</sub> – лазер;  
 2 – узкоструйная плазма; 3 – воздушная плазма; *б* – деталь, вырезанная сжатой  
 плазменной струей; *в* – зависимость скорости резки сжатой плазмой от толщины  
 стального листа

В компании Kjellberg Finsterwalde говорят о преимуществах использования последних технологических разработок при плазменной разделке кромок (plasma gouging), резке фасок и пробивке отверстий. Для разделки тонколистового металла предлагаются аппараты серии HiFocus, использующие принцип узкоструйной плазмы (рис. 5.10). В отличие от «обычной» плазмы, речь здесь идет о двухконтурном принципе формирования плазменной струи с ее стабилизацией за пределами сопла потоком дополнительно закрученного газа, поступающего из второго контура. Особенностью системы является использование достаточно короткого завихрителя вторичного газа с малыми проходными сечениями, а также наличие защитного колпака, предотвращающего шунтирование на сопловой поверхности и увеличивающего тем самым срок службы плазмотрона.

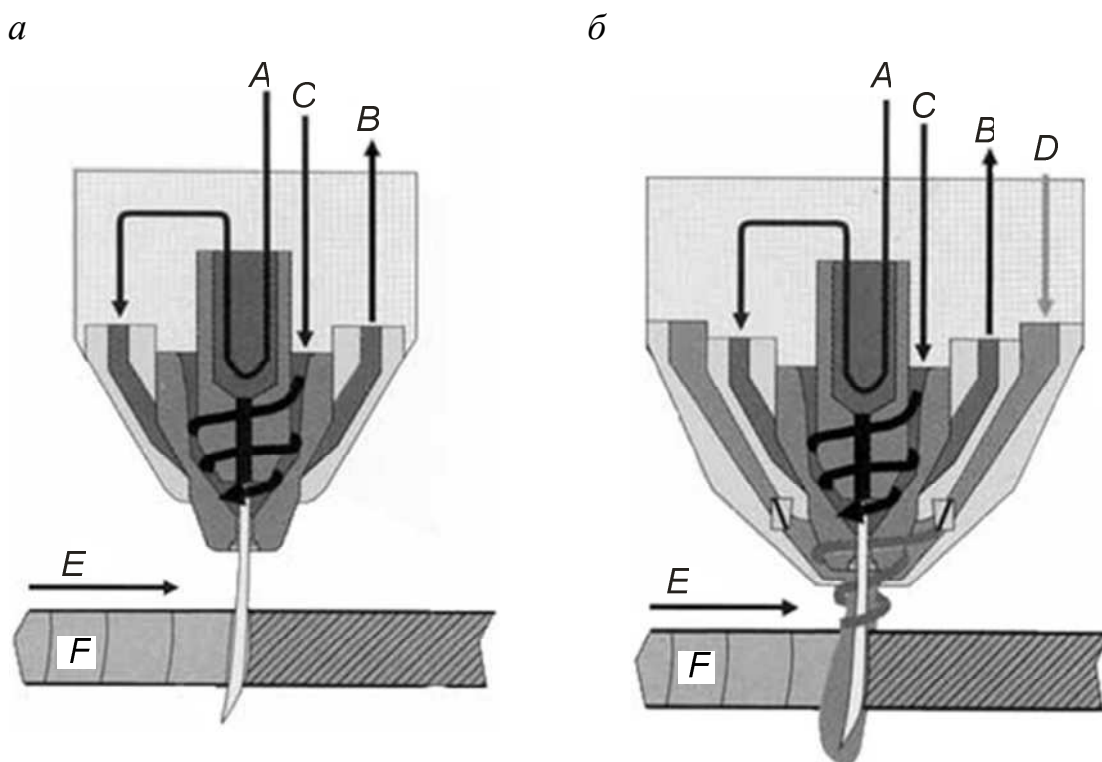


Рис. 5.10. Схемы процессов плазменной резки  
(по данным фирмы Kjellberg):

*a* – «обычная» плазма; *б* – точная, или узкоструйная, плазма: *A* – система охлаждения (вход); *B* – система охлаждения (выход); *C* – контур основного потока ПОГ;  
*D* – контур вторичного (формирующего) потока газа; *E* – направление резки;  
*F* –резаемый металл

Плазменные системы HiFocus позволяют удалить поверхностные недостатки (трещины, отдушины или включения), создавая тем самым улуч-

шенные возможности для последующей сварки. Кроме того, появляется возможность практически точечного воздействия на металл для производства меток, обработки поверхностей сплава, очистки отдельно выбранных его участков от выделений, возникших в процессе переплава. По сравнению с механическими процессами удаления рабочая скорость такой технологии обычно намного выше. С момента внедрения узкоструйной технологии, как отмечает производитель, стали возможными не только перпендикулярные поверхности среза, но и при соответствующем наклоне горелки – скосы до  $60^\circ$  с ровным, гладким срезом во всем диапазоне толщин материала. При этом деталям горелки была намеренно придана утонченная и заостренная форма, позволяющая резать в широком диапазоне углов, что дает возможность производить разделку металла под сварные швы любой формы – Y-образные, K-образные или V-образные, а также осуществлять резку фасок (рис. 5.11) [74].

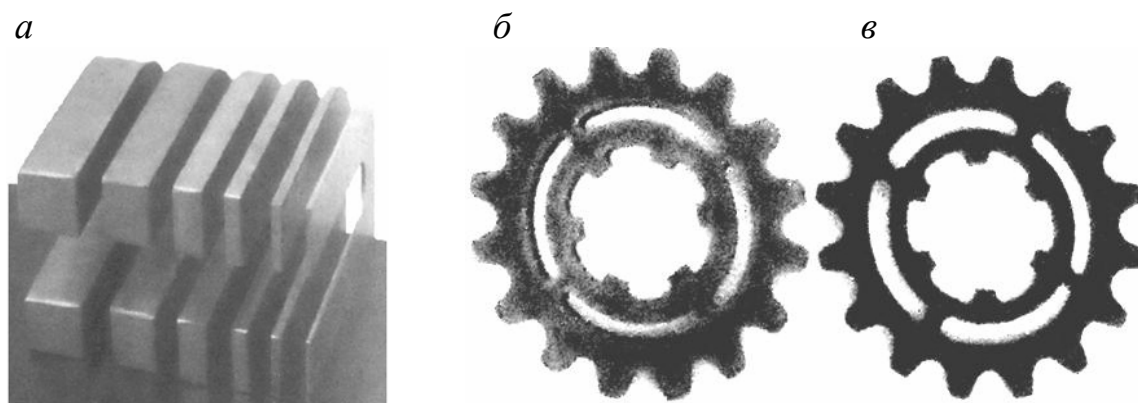


Рис. 5.11. Резка металла по технологии узкоструйной плазмы (система HiFocus фирмы Kjellberg Finsterwalde):

*а* – конструкционная сталь 3 толщиной 40 мм; *б* – конструкционная сталь толщиной 30 мм, резка автогеном, время резки 14:32 мин; *в* – конструкционная сталь толщиной 30 мм, резка плазмой, время резки 4:32 мин

В качестве своего ноу-хау компания Kjellberg Finsterwalde предлагает также технологию вырезания отверстий. Как отмечалось ранее, в связи с формой электрической дуги при вырезании отверстий имеется некий нижний предел – минимальный диаметр отверстий, который при обычной плазменной резке приблизительно равен полуторной толщине листа. За счет применения прецизионных систем плазменной резки серии HiFocus можно получать отверстия существенно меньшего диаметра (8 мм в конструкцион-

ной стали толщиной 10 мм). Качественными преимуществами являются также минимальное отклонение угла, острота кромок с верхней и нижней стороны материала, минимальная глубина ЗТВ и практическое отсутствие мест вымывания материала при входе и выходе горелки. Допуск на неодинаковость диаметра на верхней и нижней сторонах составляет 0,2 мм.

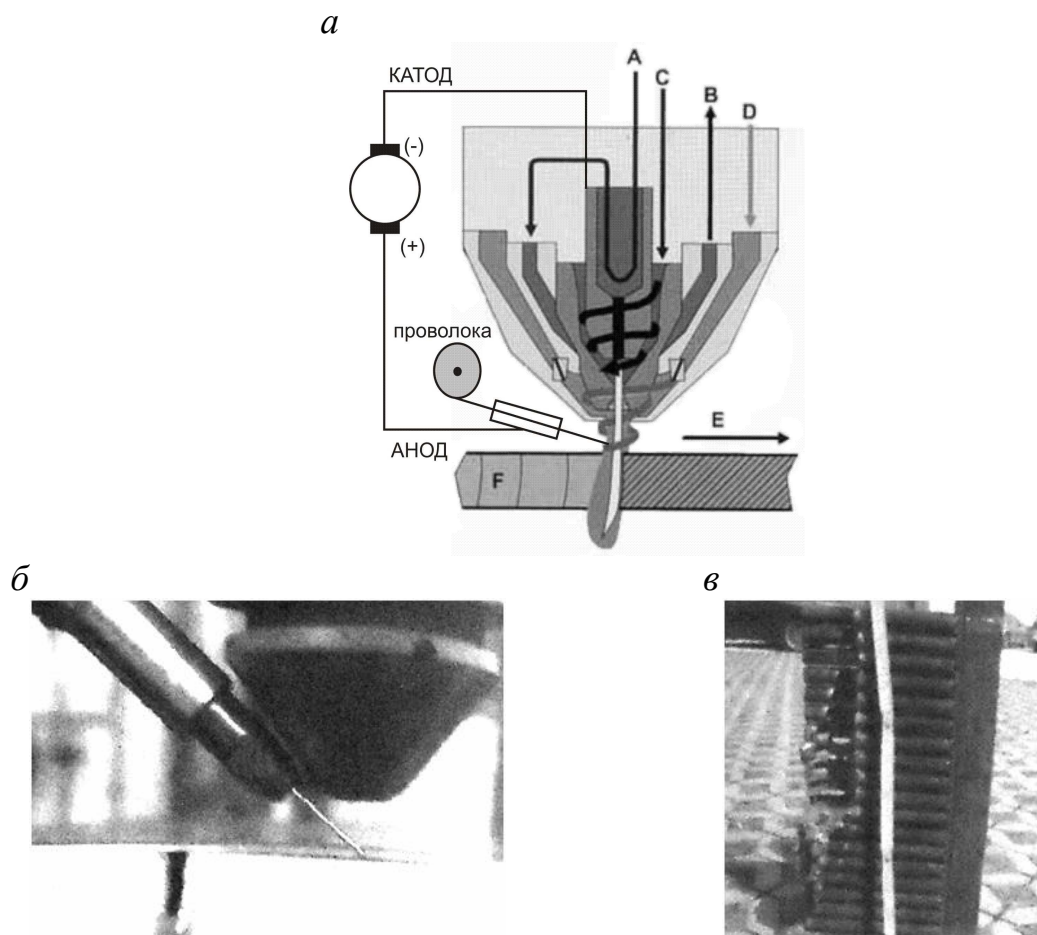


Рис. 5.12. Метод резки прерывистых структур HotWire (фирма Kjellberg Finsterwalde) [74]:

*a* – схема процесса: *A* – система охлаждения (вход); *B* – система охлаждения (выход); *C* – контур основного потока ПОГ; *D* – контур вторичного (формирующего) потока газа; *E* – направление резки; *F* – разрезаемый металл; *б* – расходуемый проволоочный анод; *в* – резка трубного пучка

В качестве дополнительной возможности, расширяющей сферу применения плазменных технологий, Kjellberg Finsterwalde рассматривает резку прерывистых структур (металлических решеток), а также неэлектропроводных материалов (армированной стекловолокном пластмассы, бетона, железобетона, керамики, стекла, армированного стекла и т. д.) [74]. Такие струк-

туры режутся плазменной струей методом HotWire (рис. 5.12), когда в качестве расходного электрода используется не обрабатываемая деталь и не сопло, а непрерывно подводимая проволока (например, сварочная), что позволяет в отличие от «классической» плазменной резки использовать плазменные горелки с такими же высокими электрическими мощностями, как при непосредственной плазменной резке. Максимальная толщина детали зависит прежде всего от мощности источника тока для плазмы, т. е. от имеющейся энергии. Диапазон режущего тока в настоящее время составляет от 200 до 300 А. Для резки используются обычные режущие газы и обычные расходные детали плазменной техники. В отличие от автогенной резки возможна не зависящая от направления резка различных контуров без предварительного нагрева и, тем самым, без использования дополнительного поворотного агрегата. В зависимости от тока резки, материала, высоты ребер и требуемой геометрии возможны скорости резания до 1,1 м/мин при сохранении хорошего качества. Максимальная высота разрезаемых ребер зависит от материала и в настоящее время составляет от 40 до 50 мм.

В качестве критериев эффективности технологии резки сжатой плазмой (система HyPerformance) представителями компании Hypertherm рассматриваются следующие показатели:

- 1) качество реза (минимальная окалина (рис. 5.13, *а, б, в*), глубина ЗТВ, отсутствие цветов побежалости, цилиндричность отверстий (рис. 5.13, *г, д, е, ж*));
- 2) продуктивность (скорость резки и прожига);
- 3) экономичность (расходы в расчете на метр реза или деталь);
- 4) прибыльность;
- 5) простота и гибкость в использовании;
- 6) повышенный уровень безопасности.

В материалах производителя отмечается, что скорости резки и прожига при использовании плазмы могут в 8,5 раз превышать соответствующие показатели кислородной резки, существенно увеличивая продуктивность работы даже без учета отсутствия необходимости в предварительном нагреве и вторичной обработке. Приводимые данные свидетельствуют о превышении скорости резки с помощью плазменной системы HyPerformance в 8,5 раз по сравнению со скоростью газокислородной резки для заготовки из низкоуглеродистой стали толщиной 12 мм, а также о достижении технологической толщины прожига до 50 мм (система HyPerformance HPR400XD). В качестве максимально достижимых параметров приводятся данные по

аппаратам HPR800XD, которые позволяют вести обработку самых толстых листов нержавеющей стали и алюминия. При этом толщина резки низкоуглеродистой стали практически без образования окалины (до 38 мм при максимальной толщине материала при резке (пуск на краю)) – 80 мм; нержавеющей стали и алюминия – 75 мм (прожиг) и 160 мм (отрезная резка).

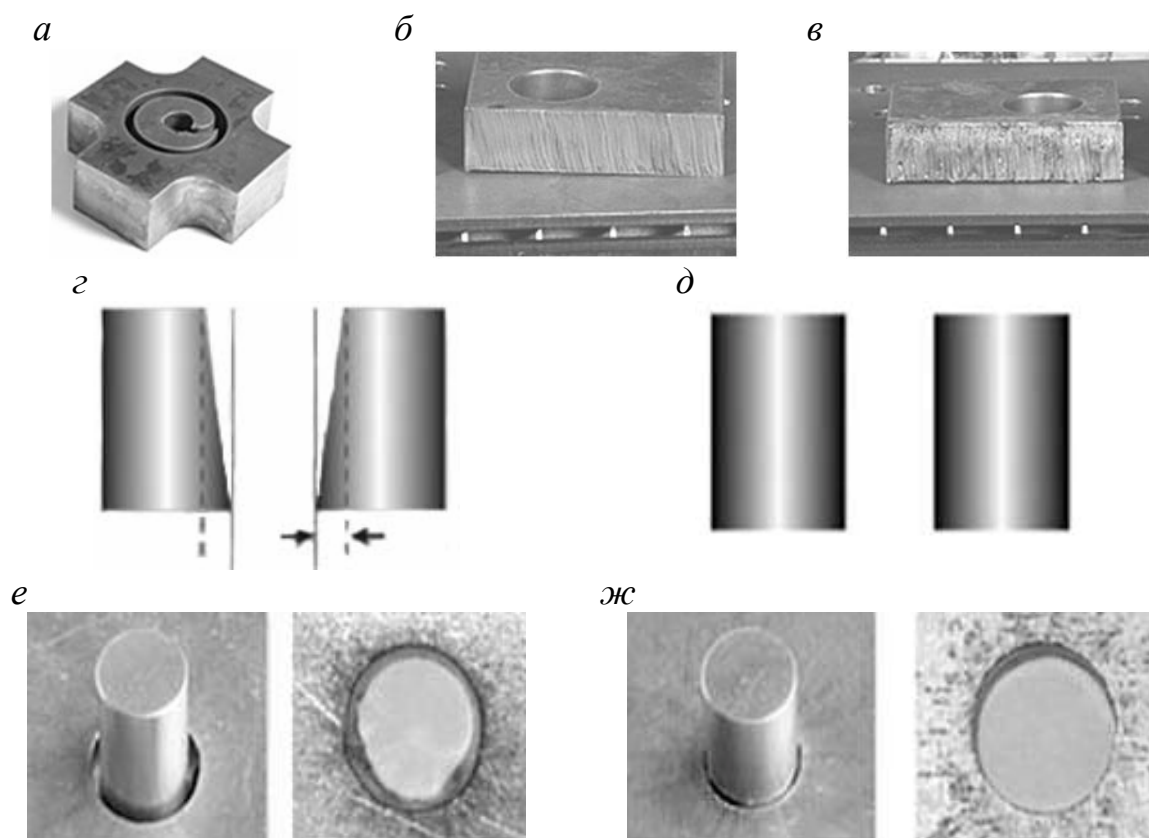


Рис. 5.13. Качество плазменной резки по технологии сжатой плазмы:

*а* – резка образца размером 2" (50 мм) аппаратом HyPerformance HPR400XD (отсутствие окалины); *б* – лист толщиной 30 мм, разрезанный ручным резаком Powermax (относительно гладкий и без окалины); *в* – лист толщиной 30 мм, разрезанный ручным газокислородным резаком (шероховатая кромка реза и неравномерные скопления окалины); *г* – поперечное сечение отверстия, вырезанного без применения технологии True Hole; *д* – поперечное сечение отверстия, вырезанного с применением технологии True Hole; *е* – отверстие диаметром 12 мм, вырезанное без применения технологии True Hole; *ж* – отверстие диаметром 12 мм, вырезанное с применением технологии True Hole

В качестве иллюстрации экономичности технологии приводятся базовые расчеты, определяющие стоимость вырезания квадратной детали с длиной стороны 0,9 м из заготовки толщиной 12 мм из низкоуглеродистой стали с помощью аппарата HPR260 и газокислородной резки. Удель-

ные затраты, как видно из табл. 5.5, в случае применения плазменной технологии в 5–6 раз меньше, чем при использовании автогена. Более низкая стоимость в расчете на деталь означает более высокую прибыльность (в приведенном примере 3,36 доллара идет непосредственно в прибыль). Как отмечают представители HyperTherm, за счет использования технологии сжатой плазмы можно поднять производительность на 30 % и сократить затраты на 40 %.

Таблица 5.5

Сравнительные эксплуатационные затраты резки металлов  
(по данным компании Hypertherm)

Параметр	Используемый аппарат	
	HPR260 (плазма)	Автоген
Эксплуатационные затраты в расчете на час, долл.	44,65	33,80
Количество погонных метров, которые можно разрезать в течение часа	221,0	30,5
Стоимость в расчете на 1 метр, долл.	0,20	1,11
Стоимость в расчете на деталь длиной 2,66 м, долл.	0,72	4,08

Особое внимание при рассмотрении преимуществ применяемых фирмой Hypertherm технологий плазменной резки уделяется обеспечению повышенного уровня безопасности процесса. Отмечается, что некоторые системы плазменной резки, например, из серии Powermax, работают на сжатом воздухе, что исключает необходимость обращения с горючими газами. Плазменные аппараты HPR и HSD могут использовать целый ряд газов (в том числе и воздух), но наиболее часто для них применяются кислород и азот. Эти газы более стабильны, чем ацетилен, и не требуют такого же тщательного специального обращения. Использование сочетания водяного стола для резки и механизированной системы плазменной разделки позволяет сократить количество вредных паров и шума. Большинство топливных газов для газокислородной резки не может быть использовано на водяном столе, так как это создает взрывоопасную ситуацию.

Как уже отмечалось выше, современные технологии плазменной резки оказываются конкурентоспособными по качеству резки с лазерной раз-

делкой при работе с материалом толщиной до 25–30 мм. При этом удельная себестоимость плазменной разделки оказывается существенно ниже из-за более низких (в 2,5–3 раза) капитальных затрат: в 3–5 раз (на толщинах свыше 3 мм) по сравнению с лазерной резкой и в 2–3 раза – с автогенной (в сопоставимых диапазонах резки). Качество при резке и пробивке металлов больших толщин хоть и незначительно снижается, тем не менее, соответствует более высоким классам точности обработки, чем при газокислородной (автогенной) резке. Отметим в этой связи упомянутое выше расширение сферы применения технологии сжатой плазмы до резки толщин (50–80 мм), ранее подвергавшихся преимущественно разделке автогенными методами. Появившаяся технология резки прерывистых и неэлектропроводных структур HotWire создает значительную конкуренцию и водабразивным методам разделки. Разумеется, обеспечение заявленных показателей качества и производительности требует, как правило, наличия высокоточных автоматизированных средств управления, однако увеличение производительности процесса дает технико-экономические преимущества технологии как обычной, так и прецизионной резки в широком диапазоне материалов различных толщин и сортамента.

Подводя итог всему вышесказанному, отметим, что появившиеся в начале XX в. новые прецизионные плазмотроны сегодня находят все большее применение, успешно конкурируя с другими технологиями резки, а иногда дополняя их. Высокое качество при пониженных энергопотреблении и удельной себестоимости, повышенная надежность и высокий ресурс работы, уменьшенный уровень шума, излучений и газовыделения – результат системного решения целого комплекса задач проектирования, заставляющий обратить пристальное внимание именно на данное направление развития плазмотронной техники. Разумеется, названные технологии имеют и ряд недостатков. Они требуют высокоточного, прецизионного изготовления, что делает такие плазмотроны несколько более дорогими, чем обычные воздушно-плазменные, а также имеют пока по сравнению с ними более узкий диапазон применимости по толщинам резки. Проблемой для конструкторов является и фактическая закрытость информации по использованию конкретных методов проектирования (иерархических, конструктивных, оптимизационных и т. д.). Как правило, производители формулируют только общие принципы их проектирования, обосновывая его резуль-



тативность улучшенными показателями эффективности прибора. В этой связи еще раз отметим отсутствие отечественных аналогов подобного оборудования. Тем не менее, очевидные преимущества, которые могут быть получены при успешном проектировании прецизионных плазмотронов, делают подобную задачу одной из наиболее актуальных в сфере конструирования электродуговых плазмотронов. Важным результатом может стать и определение методов проектирования такого оборудования.

## **5.2. Квалиметрический метод оценки эффективности проектирования плазмотронов**

*Показатели эффективности* – важный инструмент оценки не только результатов проектирования отдельного плазмотрона или технологии, но и сравнительного анализа однотипных конкурирующих конструкций. Оглядываясь на вышеприведенный анализ критериев эффективности, можно заметить, что количество демонстрируемых производителями показателей существенно меньше числа критериев, нормируемых стандартами. При этом сравнение с ними производится в редких случаях. Также вне рамок рассмотрения остаются вопросы, касающиеся применяемых экспериментальных методик, и комплексный анализ конструкции и технологии. В этой связи ниже предлагаются регламент, обеспечивающий процедуру комплексного исследования результативности проектирования по критериям эффективности, и методика сравнительного интегрального анализа плазмотронов.

I. Технологический регламент испытания параметров качества и безопасности технологии плазменно-дуговой резки металлов.

1. Технологические испытания.

1.1. Выбор режимов испытаний плазмотронов и сортамента исследуемых образцов. Отбор плазмотронов по типам, вольт-амперным характеристикам, заявленным скоростям резки и толщинам разрезаемых металлов в соответствии с заводской номенклатурой и требованиями технологии.

1.2. Испытания плазмотронов для разделительной резки. Определение оптимальных и предельных параметров процесса.

2. Экспериментальные исследования качества разделительной резки.

2.1. Пробоподготовка. Изготовление образцов, подготовка поверхности: удаление окалины, химическая очистка и травление (в зависимости от направления исследования).

2.2. Исследование параметров качества (табл. 5.6).

Таблица 5.6

## Исследования параметров качества плазменной резки

Обозначение	Параметр	Способ контроля, измерительная аппаратура
<i>Исследование образцов после плазменной резки</i>		
1К	Перпендикулярность кромки реза	Механические измерения
2К	Шероховатость поверхности кромки	Оптическая и электронная микроскопия, профилометры и профилографы
3К	Отклонения размеров от номинальных (точность реза)	Механические измерения, оптическая микроскопия
4К	Твердость поверхности кромки реза в верхнем, среднем и нижнем слое (НВ, НR, НV)	Твердомеры
5К	Толщина слоя окалины	Оптическая микроскопия
6К	Глубина зоны термического влияния	Оптическая и электронная микроскопия
7К	Величина газового насыщения поверхностного слоя металла	Газоанализаторы по кислороду и азоту, водороду (опционально)
8К	Структура металла в ЗТВ	Металлографический анализ (электронная микроскопия микрошлифов); спектральный анализ (спектрометр) – выявление присутствия нитридов, оксидов и интерметаллидных соединений
9К	Остаточные продукты резки	Химический анализ продуктов ванны расплава
<i>Исследование образцов после сварки (дополнительное)</i>		
1КС	Твердость металла шва, ЗТВ (НВ, НR, НV)	Твердомеры
2КС	Микротвердость структурных составляющих металла шва, ЗТВ (НV)	Твердомеры
3КС	Ударная вязкость металла шва, ЗТВ при разных температурах	Сервогидравлические испытания
4КС	Растяжение металла шва, ЗТВ при разных температурах	
5КС	Структура металла шва, ЗТВ	
6КС	Состав металла шва	
7КС	Статический изгиб	

3. Экспериментальные исследования факторов безопасности в рабочей зоне плазменной резки (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Исследования факторов безопасности в рабочей зоне плазменной резки

Обозначение	Параметр	Способ контроля, измерительная аппаратура
1Б	Уровень звука, уровень звуковой мощности, спектральные характеристики шума в звуковой и ультразвуковой областях излучения, диаграмма направленности	Определение акустических характеристик, шумомеры
2Б	Электромагнитное излучение (напряженность электромагнитного поля, индукция магнитного поля, плотность потока энергии, яркость, освещенность)	ВЕ-метры, люксометры, УФ-радиометры
3Б	Температурный режим	Термометрия, тепловизиометрия, пирометрия
4Б	Пылегазовыделение	Газоанализаторы

#### 4. Статистическая обработка и анализ результатов.

II. При проведении интегральной оценки эффективности результатов проектирования или конкретной конструкции плазмотрона можно опереться на известные методы квалиметрического анализа, позволяющие формализовать данную процедуру [75]. В основе формализации определения эффективности лежит использование понятия абсолютного показателя свойства  $Q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ), выражаемого в специфических для каждого свойства единицах (шероховатость – в микрометрах, уровень звука – в децибеллах (дБ (А)) и т. д.). Возможно также использование величин  $Q = 1$  или  $Q = 0$  для определения соответствия или несоответствия какого-либо свойства показателям ГОСТа. Для сопоставления различных свойств, измеряемых с применением разных по размаху и размерности шкал, используется относительный безразмерный показатель  $K_i$  (от  $-1$  до  $+1$ ), отражающий степень приближения абсолютного показателя свойства  $Q_i$  к среднему

$\langle Q_i \rangle$ , характеризующему некое среднее значение для рассматриваемого свойства (параметра):

$$K_i = (Q_i - \langle Q_i \rangle) / Q_m,$$

$$\langle Q_i \rangle = (\max\{Q_i\} + \min\{Q_i\}) / 2;$$

$$Q_m = (\max\{Q_i\} - \min\{Q_i\}) / 2,$$

где  $\max\{Q_i\}$  и  $\min\{Q_i\}$  – максимальное и минимальное значения числового показателя  $Q_i$  для рассматриваемого свойства.

При таком задании параметров  $\langle Q_i \rangle$  и  $Q_m$  свойство с наименьшим значением  $Q_i$  характеризуется безразмерным показателем  $K_i = -1$ , а для наибольшего значения  $Q_i$   $K_i = +1$ . Для сопоставления относительной важности всех свойств, определяющих суммарную эффективность устройства, задаются весовые коэффициенты  $G_i$ , фиксирующие относительную важность  $i$ -го свойства по единой для всех свойств шкале. Как правило, используются нормированные весовые коэффициенты  $H_i = G_i / \Sigma G_i$ , меняющиеся в пределах от 0 (для неважных свойств) до 1 (для важных свойств). Кроме того, задается знак  $S_i$  (положительный или отрицательный) вклада каждого из свойств в суммарную эффективность устройства. К примеру, отклонение от перпендикулярности реза должно иметь отрицательный знак – чем оно больше, тем хуже качество реза данным плазмотроном. Для того, чтобы коэффициенты менялись в диапазоне от 0 до 1, вводят дополнительный коэффициент  $L_i$ , определяемый через  $K_i$  простым арифметическим сдвигом:

$$L_i = (S_i K_i + 1) / 2.$$

Интегральный показатель эффективности выражается некоторой функцией  $L = F(L_i)$ , которая наиболее часто задается суммой вида

$$L = \Sigma H_i \cdot L_i.$$

Следует в этой связи заметить, что практически все нормируемые по ГОСТам показатели качества и безопасности плазменной резки должны иметь минимальные значения ( $S_i = -1$ ), свойственные максимальной эффективности работы (результатов проектирования) устройства. Разумеется,

если при оценке эффективности проектирования используются такие параметры, как КПД плазматрона, мощность, толщина разрезаемого металла, скорость резки, ресурс работы сменных частей, знак их вклада в расчетной формуле должен браться положительным ( $S_i = +1$ ). Некоторые параметры могут, в зависимости от критериев проектирования, оцениваться как имеющие или положительный ( $S_i = +1$ ), или отрицательный ( $S_i = -1$ ) эффект. Например, высокая мощность может быть расценена как негативный фактор, если во главу угла ставится эффективность при минимальном энергопотреблении. Сложности возникают также при сравнении отдельных параметров безопасности, которые нормируются в различных спектральных диапазонах (электромагнитное и акустическое излучение) и имеют логарифмический диапазон величин (акустические характеристики). В этом случае предпочтительно сравнивать интегральные характеристики (энергетическую освещенность, экспозиционную дозу), а для акустических характеристик сравнивать звуковые мощности  $P$ :

$$K_i = \frac{P_i - \langle P \rangle}{P_m};$$

$$P_i = 10^{0,1L_i};$$

$$\langle P \rangle = \frac{10^{0,1L_{\max}} + 10^{0,1L_{\min}}}{2};$$

$$P_m = \frac{10^{0,1L_{\max}} + 10^{0,1L_{\min}}}{2},$$

где  $P_i$  и  $L_i$  – звуковая мощность и уровень звука  $i$ -го плазматрона.

Величина  $L$  дает вполне объективную комплексную оценку относительной эффективности плазматрона по отношению к другим однотипным устройствам. Субъективность вносится лишь при определении весовых коэффициентов и перечня учитываемых свойств. Отметим также, что в случае выбора конкретной конструкции потребителем, а не проектировщиком, во внимание принимают обычно не сам показатель эффективности (качества), а соотношение цена/качество. В табл. 5.8 приводится примерный сравнительный расчет эффективности проектирования трех конструкций плазматронов (плазматроны  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ), проведенный по нормируемым параметрам качества и шума (уровню звука).

Весовые коэффициенты выбраны из расчета обеспечения наилучшего качества разделки металла под сварку. В качестве параметров качества взяты характерные для воздушно-плазменной резки стального листа длиной порядка 1000 мм и толщиной 20 мм значения при собственных плазмотронах такого типа уровнях звука.

Таблица 5.8

Квалиметрическая таблица оценки эффективности проектирования плазмотронов по показателям качества и безопасности

Весовой коэффици- ент, $H_i$	Свойства										$L$
	1К, мм		2К, мкм		3К, мм		6К, мм		1Б, дБА		
	1,0		0,2		0,5		1,0		0,8		
Плазмо- трон $A$	0,4	$L_1 = 1$	0,06	$L_2 = 1,0$	1,0	$L_3 = 1,0$	0,2	$L_4 = 1,00$	102	$L_5 = 0,57$	2,67
Плазмо- трон $B$	0,8	$L_1 = 0$	0,10	$L_2 = 0,0$	2,0	$L_3 = 0,0$	0,6	$L_4 = 0,00$	96	$L_5 = 1,00$	1,00
Плазмо- трон $C$	0,4	$L_1 = 1$	0,08	$L_2 = 0,5$	1,5	$L_3 = 0,5$	0,5	$L_4 = 0,75$	105	$L_5 = 0,00$	1,50

Как показывают результаты расчета параметра  $L$ , лучшей эффективностью обладает плазмотрон  $A$ .

## **6. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ПЛАЗМОТРОНОВ ПО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ И АКУСТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ**

### **6.1. Введение в методику**

Основным элементом любой электроплазменной технологии, как известно, является плазмотрон, работа которого определяет эффективность применения технологии в целом. Плазмотрон является сложным техническим устройством, при проектировании которого необходимо учитывать большое число нюансов, так как в процессе его работы в плазменном потоке протекает огромное количество разнообразных процессов при температурах в несколько тысяч или десятков тысяч градусов. Перед проектировщиками в этой связи возникают задачи управления данной энергией, связанные с необходимостью не только подавать газ для формирования потока плазмы в сопловой узел плазмотрона, но и организовывать газоплазменный поток для создания условий для эффективной, качественной и безопасной работы плазмотрона. Физика и методы описания таких процессов в целом известны, однако специфика решаемых задач заставляет исследователей учитывать параметрические и геометрические особенности конкретных плазменных технологий.

Любая методика конструирования дуговых плазмотронов постоянного тока должна учитывать основные факторы работы электроплазменных технологий, обобщенные принципы и методы их проектирования. При проектировании плазмотронов необходимо, в первую очередь, опираться на системный принцип и учитывать взаимодействие всех подсистем, обеспечивающих их работу. Однако, среди подсистем плазмотрона главную функциональную роль играет, как известно, сопловой узел, при проектировании которого необходим учет газодинамических, электро- и теплофизических факторов дугообразования. Применение в этих целях известных методик, полученных в 70–80-е гг. XX в. [15, 16], в настоящее время требует внесения корректив, учитывающих опыт последних лет в сфере эксплуатации, исследования и проектирования плазмотронов.

Газодинамический фактор – один из основных аспектов, требующих внимания при анализе работы любого плазмотрона, поскольку именно орга-

низация прохождения потока плазмообразующего газа (ПОГ) по газовоздушному тракту плазматрона (ГВТ) определяет, в конечном итоге, производительность, качество и безопасность всей технологии. Характерная конструкция ГВТ дугового металлорежущего плазматрона (рис. 6.1) включает в себя участок подачи газа в плазматрон, успокоительную (расширительную) камеру и систему газовихревой стабилизации, обеспечивающей за счет тангенциальной подачи ПОГ из завихрителя (вихревой камеры) в сопловой узел.

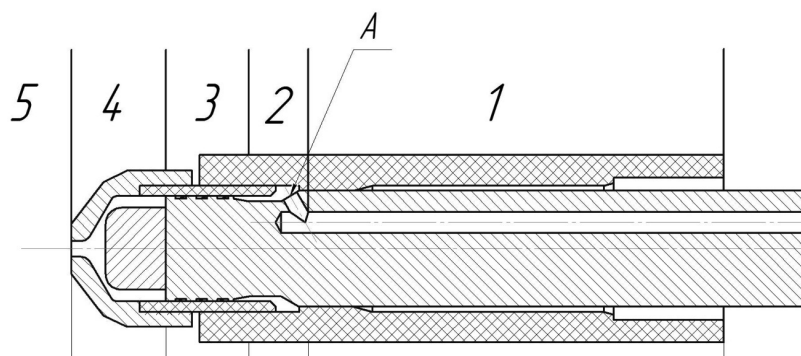


Рис. 6.1. Схема газовойоздушного тракта металлорежущего плазматрона ПМВР-М. Участки ГВТ:

1 – ввод ПОГ в плазматрон; 2 – расширительная камера; 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5 – выход плазмы; А – точка ввода ПОГ из участка 1 в участок 2 (расширительная камера)

Известные методики расчета отдельных элементов данной конструкции дают рекомендации по расчету геометрии завихрителя и соплового узла в привязке к основным характеристикам газового потока – давлению  $P$  и скорости  $V$ . Однако, подобный подход не учитывает неизбежные потери давления, возникающие на предшествующих сопловой камере участках ГВТ (в первую очередь, в завихрителе). Кроме того, методика подразумевает условие равномерности распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ в электродуговой камере плазматрона, которое, как показали исследования авторов, не выполняется из-за асимметричной и неравномерной подачи газа в расширительную камеру. Это, в свою очередь, влияет на качество и надежность работы плазматрона. Следует также учесть особенности проектирования плазматронов, работающих по технологии узкоструйной (точной или сжатой) плазмы с применением двухпоточной схемы подачи ПОГ и нескольких вихревых камер. Влияние газодинамического фактора необходимо также учитывать и с точки зрения акустической безопасности – важного аспекта, определяющего безопасность работы технологии плазменной резки.



Алгоритм применения программных средств в процедурах проектирования электроплазменных технологий включает в себя нижеследующие процедуры:

- 1) построение модели проектирования;
- 2) проектирование по газодинамическим критериям;
- 3) проектирование по теплофизическим критериям;
- 4) проектирование по критериям акустической безопасности;
- 5) проектирование технологии и вспомогательного оборудования.

## 6.2. Построение модели проектирования

На начальном этапе проектирования необходимо средствами геометрического проектирования (CAD) сформировать 2D-модель (рис. 6.1) или 3D-модель (рис. 6.2), которая затем путем неизбежной редукции малозначимых деталей и элементов будет трансформирована в аналитическую модель для параметрического и геометрического анализа.

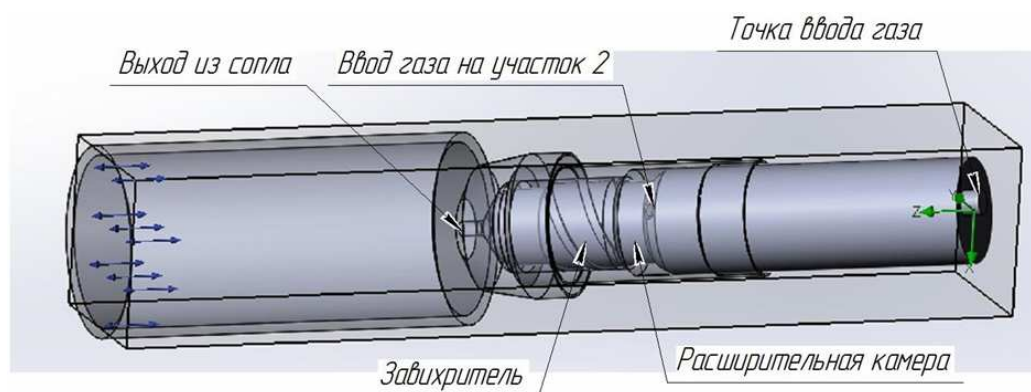


Рис. 6.2. Расчетная 3D-модель плазмотрона

На этой стадии проектирования можно опираться на известные конструктивные решения, применяемые для плазмотронов характерного типа и назначения.

Для металлорежущих плазмотронов, предназначенных для резки металлов средних и больших толщин, как правило, используется схема однопоточной подачи плазмообразующего газа (ПОГ), включающая в себя элементы газовоздушного тракта (ГВТ), представленные на рис. 6.1: 1 – входная часть, 2 – зона выравнивания потока газа, 3 – завихритель, 4 – сопловой узел, 5 – область формирования плазменной струи. Основы проектирования плазмотронов подобного типа были сформулированы еще в 70–80-х гг. XX в. в Ин-

ституте теплофизики СО АН СССР под руководством академика М. Ф. Жукова. В качестве определяющих параметров для вихревой камеры (завихрителя) рассматривались давление торможения, площадь сечения  $S_{\text{сеч}}$  и количество тангенциальных отверстий  $N_{\text{отв}}$  в кольце закрутки, отношение диаметра этого кольца  $D_{\text{кз}}$  к диаметру выходного электрода  $D_{\text{вэ}}$ . В результате были сформулированы следующие рекомендации по проектированию вихревых камер [15]:

1.  $D_{\text{кз}}/D_{\text{вэ}} = 3,5 \div 5$ .

2.  $N_{\text{отв}} \geq 4$  с равномерным размещением по окружности.

3. Суммарная площадь сечения  $S_{\text{сеч}}$  должна обеспечивать скорость истечения газа  $V \sim (0,3 \div 0,5)C_{\text{зв}}$  ( $C_{\text{зв}}$  – скорость звука при заданном полном давлении и температуре ПОГ).

4. Протяженность тангенциальных каналов  $L_{\text{к}} \geq (3 \div 4) D_{\text{кз}}$ .

5. Условия выбора величины межэлектродного зазора (для плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги обычно 2÷5 мм):

- отсутствие газодинамического запираания ПОГ в сечении зазора;
- возможность его пробоя при напряжении осцилляторного пуска;
- электрическая стабильность дуги в рабочем режиме.

Сформированный в вихревой камере поток газа подается в электродуговую камеру (тепловое сопло), где происходит его нагрев и ускорение (дополнительно – за счет падения давления в направлении потока), в соответствии с соотношением для числа Маха:

$$M = \frac{V}{C_{\text{зв}}} = \frac{\sqrt{T}}{P}. \quad (6.1)$$

Однако, известный эффект теплового запираания не позволяет превысить сверхзвуковой предел скорости потока за счет подвода тепла. В результате при отсутствии дуги холодный газ подается в дуговую камеру при  $M \sim 0,7$  и ускоряется трением до звуковой скорости на выходе. При наличии дуги в сопловом узле число Маха и расход  $G$  на входе в сопло снижается, а величина критической скорости  $a_{\text{кр}}$  – возрастает. Отсюда следует, что сечение  $F$  цилиндрической электродуговой камеры должно быть не менее величины, определяющей достижение скорости звука в ее конце:

$$F \geq \frac{G}{\rho_{\text{кр}} a_{\text{кр}}}, \quad (6.2)$$

где  $\rho_{\text{кр}}$  – плотность газа в критическом сечении дуговой камеры.

Из этого условия следует, что диаметр дуговой камеры должен быть не меньше следующего значения:

$$d \geq d_{\text{кр}} = 2 \sqrt{\frac{G}{\pi \rho_{\text{кр}} a_{\text{кр}}}}. \quad (6.3)$$

Так как рост скорости ПОГ за счет притока тепла происходит особенно интенсивно вблизи критической скорости, во избежание теплового кризиса величину скорости следует ограничивать за счет увеличения диаметра канала дуговой камеры до значений выше критических. При этом, однако, уменьшается частота крупномасштабного шунтирования и увеличивается эрозия электродов. Помимо этого происходит рост длины пути частиц вихревого потока газа в камере и количества потерь на трение о стенки, а следовательно, уменьшение тангенциальной компоненты скорости газа и ухудшение стабилизирующих свойств вихревого потока. Данные причины обуславливают еще одно конструктивное требование – обеспечение скорости холодного потока ПОГ на выходе из завихрителя не менее 30 м/с [15].

Практически при расчете диаметра дуговой камеры используется следующее соотношение:

$$d = (1,2 \div 2,0) d_{\text{кр}}, \quad (6.4)$$

в котором меньшее значение соответствует работе на малых давлениях, а верхнее – в области его высоких значений (~30 атм). В результате у внутреннего электрода создается пониженное давление и облегчаются условия его работы.

На этой стадии проектирования для выбора типовых конструктивных элементов можно использовать информационно-справочные модели, представленные в приложении (рис. 1–4).

### 6.3. Проектирование по газодинамическим критериям

Вторым этапом проектирования должен стать газодинамический анализ сформированной конструкции плазмотрона.

На первой стадии газодинамического анализа модели плазмотрона можно выполнить оценку потери давления в ГВТ. Для подобных расчетов не обязательно применять специализированные программные пакеты, используя известные газодинамические зависимости [76] для оценки динамических и инерционных потерь, зависящих от сильно изменяющейся гео-

метрии ГВТ на различных его участках, в различных программных средах типа MathCAD или MATLAB. Для однотипных однопоточных плазмотронов для воздушно-плазменной резки (ПВР-402, ПМВР, ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА и др.) можно с точностью ~5 % использовать аппроксимационные формулы для расчета суммарного количества потерь  $\Delta P_{\Sigma}$  [атм] в зависимости от входного давления  $P_{\text{вх}}$  [атм], объемного  $Q$  [л/с] и массового  $G$  [г/с] расходов ПОГ [28]:

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,21 \cdot P_{\text{вх}}^{0,5} \cdot Q^{1,8} \text{ и } \Delta P_{\Sigma} = 0,11 \cdot P_{\text{вх}}^{-0,75} \cdot G^{1,64 P_{\text{вх}}^{0,08}}. \quad (6.5)$$

Скорректированные с учетом данных расчетов значения давления можно использовать для определения средних по сечению газодинамических характеристик потока ПОГ, а расчет уточненного значения давления  $P_{\text{вых}}$  на выходе из ГВТ плазмотрона позволяет оценить параметры истечения плазменной струи:

$$\begin{aligned} V_{\text{вых}} &= a_{\text{кр}} \cdot \lambda; a_{\text{кр}} = 18,3 \sqrt{T}; \lambda = -\frac{m}{2y \cdot n} + \sqrt{\left(\frac{m}{2y \cdot n}\right)^2 + \frac{1}{n}}; m = \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}; \\ n &= \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}; \\ y &= \frac{G \cdot g \cdot \sqrt{T}}{0,404 \cdot P_{\text{вых}} \cdot F}; P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - \Delta P_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

где  $a_{\text{кр}}$  – критическая скорость звука при данной температуре  $T$ ;  
 $F$  – площадь сечения участка ГВТ;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\gamma$  – показатель адиабаты;  
 $\lambda$  и  $y$  – газодинамические функции [76].

Более строгий анализ можно провести, используя возможности специализированных программных пакетов, например EFD.lab. Как показали исследования, конструкция ГВТ отдельных плазмотронов не обеспечивает эффективную подачу ПОГ в сопловой узел из-за больших потерь давления, вызванных, в первую очередь, конструкцией завихрителя (до 60 % инерционных потерь), а также большим перепадом площадей поперечного сечения на отдельных участках ГВТ. Основной задачей проектирования в этой связи становится снижение потерь давления по ГВТ конструктивными методами в целях повышения кинетических и энергетических параметров плазменной струи, снижения тепловых потерь в сопловом узле плазмотрона.

Для оценки эффективности проектирования ГВТ по данному критерию можно использовать известные рекомендации [15], определяющие наилучшие значения окружной скорости газа на входе в вихревую камеру соплового узла плазмотрона в 150–200 м/с. При этом для обеспечения долговечности работы электродов и высокой стабилизации положения дуги в сопловом канале необходимо обеспечить эффективность закрутки:

$$V_t / V_o = 7 \div 12, \quad (6.7)$$

где  $V_t$  – тангенциальная составляющая скорости газа;

$V_o$  – осевая составляющая скорости газа.

При этом, если  $V_t / V_o < 5$ , то электрод быстро выгорает из-за эффектов шунтирования (замыкания) дуги на поверхность сопла [77]. Кроме того, для стабилизации дуги и охлаждения стенок необходимо создать в вихревом и сопловом канале соплового узла значительный радиальный градиент давления (до 2 атм/мм). Для выполнения последних условий можно также использовать типовые конструкции завихрителей, представленные в информационно-справочных моделях (см. пример в приложении, рис. 2). При несоблюдении вышеупомянутых условий следует внести изменения в конструкции элементов ГВТ, создающих большие газодинамические сопротивления (завихритель и участки резкого изменения площадей поперечного сечения и объемов ГВТ), а также провести оптимизацию конструктивных параметров завихрителя (длина, шаг винта, число и сечение каналов).

На второй стадии газодинамического анализа следует определить эффективность газовихревой стабилизации (ГВС) в области формирования плазменной дуги (сопловом узле) по критерию равномерности распределения скоростей газового потока по сечению ГВТ. Основная причина подобной неравномерности заключается в общепринятом асимметричном способе подачи ПОГ в расширительную камеру, которая в силу ограниченности своих размеров не успевает сформировать равномерный газовый поток перед его распределением по каналам завихрителя. Подобная асимметрия скоростей сохраняется и при прохождении ПОГ через сопловой узел, вызывая упомянутые негативные эффекты.

Для оценки неравномерности распределения газового потока необходимо использовать программные средства системы автоматизированного расчета и конструирования CAE (computer-aided engineering) типа ANSYS/Multyphysics, T-FLEX, AI\*NASTRAN и MSC.NASTRAN, позволяющие производить расчеты газодинамических параметров в заданных точках

ГВТ. Можно использовать менее мощные средства анализа, которыми обладают системы, встроенные в САПР, например, COSMOS/FloWorks или EFD.lab для SolidWorks. Как правило, движение и теплообмен текучей среды моделируется в данных программных средах с помощью уравнений Навье – Стокса, уравнений состояния компонентов текучей среды, а также эмпирических зависимостей плотности, вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры  $T$  и давления  $P$ . Так как течение газа происходит внутри плазмотрона, то граничные условия, определяющие связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее, задаются параметрами текучей среды на входном (массовый расход ПОГ) и выходном (статическое давление) отверстиях модели. Для нахождения искомого численного решения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов дискретизируется как по пространству, так и по времени. При этом минимальный размер ячейки основной расчетной сетки можно выбрать по величине площади канала проточной части плазмотрона с наименьшим сечением, что обеспечивает получение достоверных результатов при выполнении расчета.

Процесс определения равномерности распределения динамических характеристик газового потока зависит от аппаратных возможностей применения программного комплекса и требуемой точности вычислений. При ограниченных ресурсах (в том числе временных) можно остановиться на расчете скоростей потока ПОГ в 4 симметричных точках в выбранном сечении плазмотрона, причем одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Расположение точек расчета скорости потока ПОГ:

а – по сечению каналов ГВТ; б – в контрольной плоскости

Очевидно, что абсолютно равномерный поток должен характеризоваться равенством скоростей во всех расчетных точках. Степень неравномерно-

сти распределения скорости потока по сечению ГВТ плазмотрона в этом случае можно оценить путем нахождения отношений скоростей (см. рис. 6.5):

$$K_i = V_1/V_2 = V_1/V_3 = V_1/V_4 \quad (6.8)$$

Анализ неравномерности желательно провести по всему ГВТ (начиная с расширительной камеры), так как это позволит выявить участки, требующие конструктивных изменений. Расчет скоростей можно выполнять по контрольным линиям сечения канала ГВТ (см. рис. 6.5) и по осевым линиям в направлении движения потока газа (рис. 6.6). Для упрощения расчета можно его выполнять на холодной струе газа, так как нагрев ПОГ происходит в сопловом канале ГВТ, а равномерность распределения ПОГ должна быть обеспечена уже на входе в сопловую камеру.

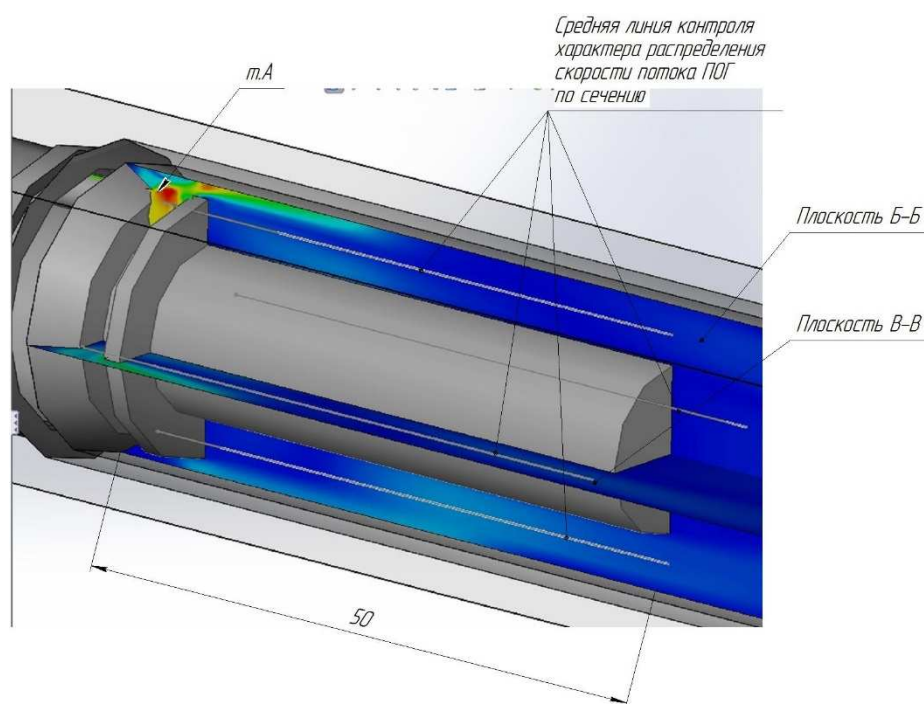


Рис. 6.6. Схема расположения участков контроля скорости потока ПОГ

При анализе большого числа контрольных точек, взятых по периметру контрольной линии в сечении, следует воспользоваться статистическими методами. В этом случае в качестве критериев равномерности распределения скоростей можно использовать следующие параметры:

а) размах вариации  $R = V_{\max} - V_{\min}$ ;

б) отношение вариации  $L = V_{\max}/V_{\min}$ ;

в) среднее линейное отклонение (СЛО)  $a = \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{n}$ ;

г) среднее квадратическое отклонение (СКО)  $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 / n}$ ;

д) коэффициент вариации  $F = \frac{S}{\bar{V}}$  при больших объемах выборки

(в нашем случае  $n > 40$ )  $S \approx \sigma$ , где  $\sigma$  – дисперсия случайной величины.

При выборе единственного критерия эффективности ГВС следует остановиться на коэффициенте вариации  $F$ , дающем выраженное в процентах отношение СКО (дисперсии) скорости к ее среднему значению в анализируемой выборке. Данный параметр легко вычисляется, например в Excel, где имеется встроенная функция расчета СКО.

Критерии эффективности ГВС при моделировании на «холодном» потоке ПОГ по показателям  $K_i$  и  $F$ :

$$K_i < 1,1; F < 1 \%. \quad (6.9)$$

Моделирование течения потока газа позволяет получить характерную картину изменения газодинамических параметров, величины скоростей газового потока на отдельных участках тракта плазмотрона, давление и плотность распределения газового потока по сечениям каналов плазмотрона (рис. 6.7). Выполненные расчеты дают возможность определить зоны возмущений потока газа, которые негативно влияют на характер его течения, сопровождаемое появлением вихревых зон, потерей скорости и давления, наличием неравномерности распределения потока по сечению каналов плазмотрона. По результатам такого анализа определяются участки узлы плазмотрона, которые требуют конструктивных изменений для улучшения условий течения газа.

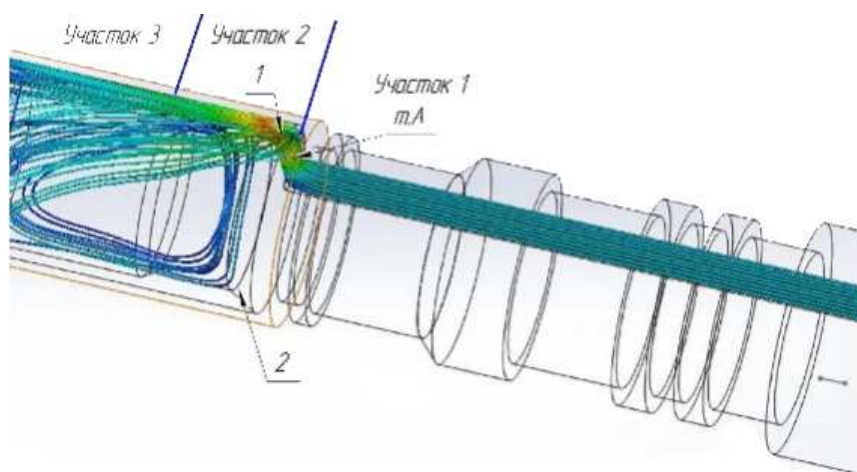


Рис. 6.7. Схема распределения скорости потока ПОГ по ГВТ плазмотрона ПМВР-М:

- 1 – характеризуется максимальным значением скорости потока газа на данном участке;
- 2 – характеризуется минимальным значением скорости потока газа на данном участке



Примером подобных коррекций является проектирование плазмотрона ПМВР-2М, в котором по результатам газодинамического анализа ГВТ плазмотрона ПМВР-М была предложена система газодинамических фильтров, включающая в себя оптимизированную по размерам расширительную камеру с дополнительной стенкой и сеткой на входе в завихритель [78]. Кроме того, была предложена и оптимизирована конструкция завихрителя с шестизаходной резьбой [60].

После газодинамического анализа модернизированной конструкции ГВТ на «холодном» газе, следует провести анализ эффективности ГВС с учетом нагрева ПОГ плазменной дугой. Оценку распределения температур в сопловом узле можно провести по методике [12] с учетом сорта и параметров ПОГ или используя экспериментальные данные [55]. Критерии эффективности ГВС при моделировании с учетом нагрева газа плазменной дугой по показателю  $F$ :

- для однопоточных плазмотронов  $F < 5 \%$ ,
- для узкоструйных (с дополнительным обжатием дуги) плазмотронов  $F < 3 \%$ .

В случае невыполнения указанных критериев необходимо внести дополнительные конструктивные изменения для повышения эффективности ГВС. Такими изменениями могут, например, стать симметричная подача газа в камеру расширения, применение двух камер расширения и двух завихрителей и т. д. (требуется оптимизация их размеров и положения по критериям эффективности ГВС и минимизации потерь давления).

Отдельно следует упомянуть использование двухпоточного (двухконтурного) способа плазменной резки применяемого в технологии «точной», «сжатой» или «узкоструйной» плазмы. В этом случае эффективность ГВС повышается за счет дополнительного обжатия основного («плазмообразующего») потока дополнительным («формирующим») потоком газа. Конструктивно ГВТ дополнительного контура может быть исполнено в большом количестве вариантов – с независимой подачей газа в плазмотрон по контурам и с разделением единого потока на два на одном из участков ГВТ, с применением завихрителя и без него, с обжатием до соплового канала и за пределами плазмотрона. В качестве основных критериев проектирования ГВТ 2-го контура следует ввести минимиза-

цию газодинамических потерь и характерные соотношения для геометрии двухконтурных сопел:

- для «обычного» профиля скоростей ( $V_1 > V_2$ ) двойное сопло должно быть с относительно широким внешним диаметром:

$$D_2/D_1 \approx 2; \quad (6.10)$$

- для «перевернутого» профиля скоростей ( $V_1 < V_2$ ):

$$D_2/D_1 < 1, \quad (6.11)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – средние осевые скорости потока;  
 $D_2$  и  $D_1$  – средние диаметры сопловых каналов.

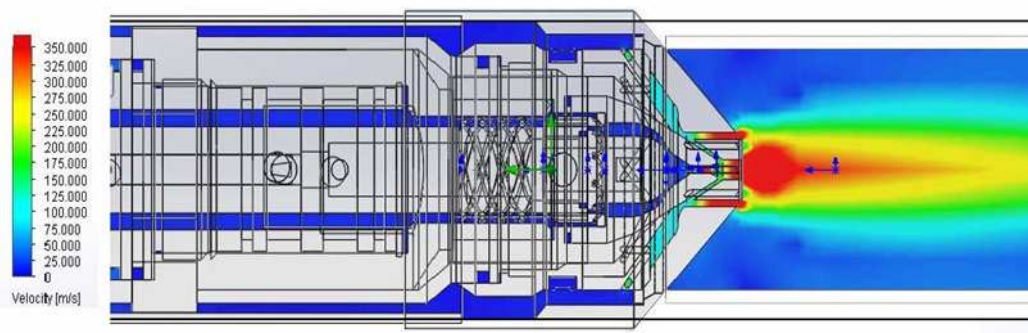


Рис. 6.8. 3D-моделирование газодинамических процессов  
 в плазмотроне ПМВР-5

Вариант (6.11) более предпочтителен по критерию меньшего акустического излучения сформированной дуосной плазменной струей. Пример газодинамического анализа конструкции двухпоточного «узкоструйного» плазмотрона приведен на рис. 6.8.

## 6.4. Проектирование по теплофизическим критериям

На третьем этапе проектирования должен быть проведен анализ эффективности работы системы охлаждения теплонагруженных узлов плазмотрона.

В результате модернизации плазмотрона, проведенной по газодинамическим критериям, должно быть достигнуто повышение его тепловой мощности (теплового к.п.д.), а следовательно, требуется анализ эффективности работы системы охлаждения. Особое внимание должно быть уделено плазмотронам, работающим в режиме большой потребляемой мощно-

сти и использующим принудительную систему водяного охлаждения. Конструкция катода таких плазмотронов представляет собой медный несущий корпус в виде полого цилиндра, в который вставлена трубка для подачи охлаждающей воды, омывающей внутреннюю поверхность корпуса. Вода из полости катода после нагрева поступает в рубашку охлаждения соплового узла, после чего по системе каналов удаляется из плазмотрона. Для охлаждения теплонагруженных узлов плазмотрона – электрода и сопла – рекомендуется использовать дистиллированную воду или тосол (при низких температурах), циркулирующих через резервуар-охладитель объемом не менее 1 м<sup>3</sup>.

В процессе анализа по теплофизическим критериям должен быть сделан выбор материала для изготовления элементов конструкции плазмотрона, а также плазмообразующих и защитных газов, используемых в процессе эксплуатации.

Тракты водяного охлаждения (ТВО) должны быть проанализированы по гидродинамическим критериям. ТВО рассматриваемых плазмотронов представляют собой систему каналов с переменной площадью поперечного сечения (ПС), что обусловлено как конструктивными, так и технологическими особенностями. Для каждого участка ТВО должен быть произведен расчет потерь динамического напора, включающих инерционные потери из-за местных гидравлических сопротивлений и линейные потери давления за счет вязкости, и определены средние по сечению осевые скорости жидкости и характер течения по числу Рейнольдса.

Так как основной функциональной задачей системы охлаждения является увеличение ресурса работы катода, наибольшая скорость воды должна достигаться на выходе из входной трубки в область охлаждения торцевой части катодной полости, обеспечивая при этом максимальную степень турбулизации потока ( $Re \approx 10^4$ ). Такой же режим должен быть и на остальных участках ТВО, за исключением рубашки охлаждения соплового узла (переходный режим при  $Re \approx 2000$ ), в которой циркуляция воды происходит в переходном от ламинарного к турбулентному режиму за счет большого гидравлического диаметра каналов ТВО. Конструкция ТВО должна обеспечивать свободную прокачку теплоносителя, отвечая критерию суммарных потерь по всему тракту от давления на входе:

$$\Delta P_{\Sigma} / P_{\text{вх}} < 10 \%. \quad (6.12)$$

На этапе последующего анализа должен быть исследован катод, являющийся наиболее теплонагруженным элементом конструкции плазмотронов прямого действия, так как при небольших тепловых потоках в малое по размерам катодное пятно плотности тепловых потоков достигают больших величин ( $10^7$ – $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>). Сравнительный анализ эффективности охлаждения катодов можно осуществить по методике М. Ф. Жукова и А. С. Аньшакова [15]. В качестве основных критериев эффективности охлаждения можно использовать:

1) коэффициент надежности охлаждения  $K_{\text{охл}}$ , определяемый отношением критической (для данных условий) плотности теплового потока  $q_{\text{кр}}$  (условие возникновения кризиса кипения) к плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности  $q_w$ :

$$K_{\text{охл}} = q_{\text{кр}}/q_w; \quad (6.13)$$

2) температуру охлаждаемой поверхности  $t_w$ , °С (недогрев до температуры кипения при данных условиях  $t_k$ , °С):

$$t_w = t_b + q_w/\alpha, \Delta t = t_k - t_w, \quad (6.14)$$

где  $t_b$  – средняя температура теплоносителя;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи охлаждаемой поверхности,  $t_k = 100\sqrt[4]{P \cdot 10^5}$ ;

$P$  – давление жидкости, атм.

Коэффициент надежности охлаждения можно рассчитать по формуле;

$$K_{\text{охл}} = \frac{q_{\text{во}} (1 + B(t_k - t_b)) \sqrt{\frac{V}{V_{\text{во}}}}}{q_w}, \quad (6.15)$$

где  $V$  – скорость теплоносителя на входе в узел охлаждения катода (по данным гидродинамического анализа ТВО);

значения коэффициентов  $q_{\text{во}}$ ,  $V_{\text{во}}$  и  $B$  – из [15], в зависимости от давления теплоносителя.

Тепловой поток от пятна дуги в катод можно определить по аппроксимирующей формуле для термохимического катода:

$$Q_T = 2,34 \cdot I, \quad (6.16)$$

где  $I$  – сила тока плазменной дуги, А.

Плотность теплового потока на внутренней охлаждаемой поверхности:

$$q_w = Q_T/(2\pi r^2), \quad (6.19)$$

где  $r$  – радиус, задаваемый геометрией катода (рис. 6.9).

Коэффициент теплоотдачи определяется с учетом геометрии соплового узла (отношения  $l/d$  – (см. рис. 6.9)) и параметров теплоносителя (давления  $P$ , объемного расхода  $Q$ ):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_r}, \quad Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon \frac{l}{d}, \quad (6.18)$$

где  $D_r$  – гидравлический диаметр трубки подачи охлаждающей воды [м].

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , чисел Прандтля при температурах теплоносителя  $Pr$  и охлаждаемой поверхности  $Pr_w$  определяются по данным [79], коэффициент  $\varepsilon$  – по таблице из [15],  $D_r$  и  $Re$  – по результатам гидродинамического анализа ТВО. Точность определения поверхностной температуры  $t_w$  в 1–2 °С достигается в процессе итерационного расчета (в среднем после 3 итераций).

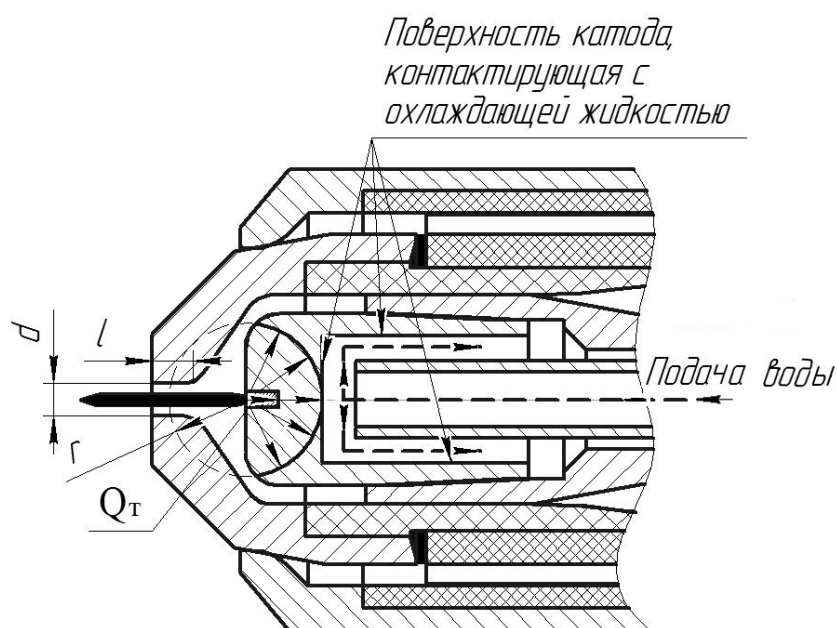


Рис. 6.9. Плазмотрон ПМВР-М: тепловой поток и система охлаждения в катодном узле

Представленный расчет позволяет определить эффективность охлаждения катода и технологические диапазоны его работы. В качестве критериев можно взять

$$K_{охл} > 2, \quad \Delta t > 20^\circ. \quad (6.19)$$

Целесообразно не использовать минимально допустимые режимы, поскольку в этом случае катод работает в условиях минимального недо-

грева и неизбежные колебания теплового потока от катодного пятна, вызванные газодинамическими пульсациями потока плазмообразующего газа (ПОГ), могут привести к резкому переходу в режим пленочной теплоотдачи и кризису кипения с быстрым выходом катода из строя. Следует учитывать также эффект возрастания плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности при выгорании катодной вставки ( $\approx$  в 2,3 раза при выгорании на 2 мм).

В качестве мер, повышающих эффективность охлаждения катода, можно использовать повышение скорости прокачки жидкости за счет увеличения давления, расхода на входе в плазмотрон и изменения геометрии подающей трубки до  $V > 4$  м/с в режиме развитой турбулентности ( $Re > 20\,000$ ), а также профилирования внутренней поверхности катода в целях увеличения его водоохлаждаемой площади.

Следующим этапом проектирования должен стать анализ системы охлаждения соплового узла.

В конструкциях сопловых узлов большинства современных плазмотронов применяется система их естественного охлаждения. Это обосновано тем, что фактически длина сопла  $L$  (от торца катода до выходного отверстия) оказывается меньше (при малых токах) или сопоставимой (при максимальных токах  $\sim 400$  А) с длиной начального участка потока ПОГ и плазменной дуги  $Z$ . Длину такого участка (в калибрах) можно оценить по уравнению (ПОГ – воздух) [15]:

$$\bar{Z} = \frac{Z}{d} = 1,435 \cdot \frac{Re^{0,27}}{1 + 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{I}{49,6d} \right)^{1,1}}, \quad (6.20)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$d$  – диаметр сопла, м;

$Re$  – число Рейнольдса в сопловом канале.

Критерий эффективности охлаждения сопла в этом случае

$$L < Z. \quad (6.21)$$

Выполнение данного условия обеспечивает в пределах соплового узла изоляцию теплового слоя дуги от турбулентного слоя вихревого потока ПОГ. В результате снижается вероятность шунтирования дуги на стенках канала, а мощность тепловых потерь определяется, главным образом, потоком излу-

чения с единицы поверхности теплового слоя дуги (менее  $100 \text{ Вт/см}^2$  при давлениях ПОГ менее 5 атм.). Защитную функцию стенок соплового канала в этом случае достаточно эффективно берет на себя вихревой поток поступающего из завихрителя ПОГ, обеспечивая при этом нагрев поверхности сопла до безопасных для высокотеплопроводной меди температур в пределах  $150^\circ\text{C}$  [15]. В целях повышения эффективности охлаждения следует обеспечить эффективность газовихревой стабилизации по критериям, рассмотренным в п. 6.3. В связи с тем, что ресурс соплового узла, как правило, примерно в 3 раза более длителен, чем ресурс катода, следует в целях экономии материала уменьшить объем сменной части соплового узла, а также повышать тепловой к.п.д. плазмотрона при работе на меньших токах, следовательно, в условиях меньшей тепловой нагрузки на сопловой узел.

## **6.5. Проектирование по критериям акустической безопасности**

На четвертом этапе проектирования целесообразно провести анализ полученных конструкторских решений по критериям акустической безопасности.

На первой стадии исследования следует проанализировать геометрию ГВТ плазмотрона. Целью такого анализа должны стать рекомендации по профилированию ГВТ с тем, чтобы устранить условия для резонансного возбуждения тональных составляющих акустического спектра шумоизлучения плазмотрона. Чтобы решить эту задачу следует, с учетом технологических возможностей, минимизировать изменения площадей поперечных сечений и объемов отдельных участков ГВТ, включающих завихритель и сопловую камеру (рис. 6.10). В целях минимизации затрат подобную процедуру следует совместить с мероприятиями, описанными в п.6.3 рассматриваемой методики.

Одной из рекомендаций, которая, как правило, формулируется по результатам такого анализа, должна стать оптимизация геометрии соплового узла с целью предотвращения генерации тональных составляющих шума. Как правило, сопловой узел плазмотрона для резки представляет собой конфузور (сужающийся канал) с переменным профилем проходного сечения ГВТ, обусловленным несогласованным изменением профилей катода и сопла. Анализ влияния конструктивных особенностей ГВТ на характер спектра излучения показывает, что появление двух резонансных частот

возможно только при определенных геометрических соотношениях отдельных элементов соплового узла [28]. Второй резонансный пик в спектре должен появиться в случае, когда размеры расширения 2 больше, чем расширения 1 (см. рис. 6.10):

$$V_2 > V_1 \text{ или } S_2 > S_1. \quad (6.22)$$

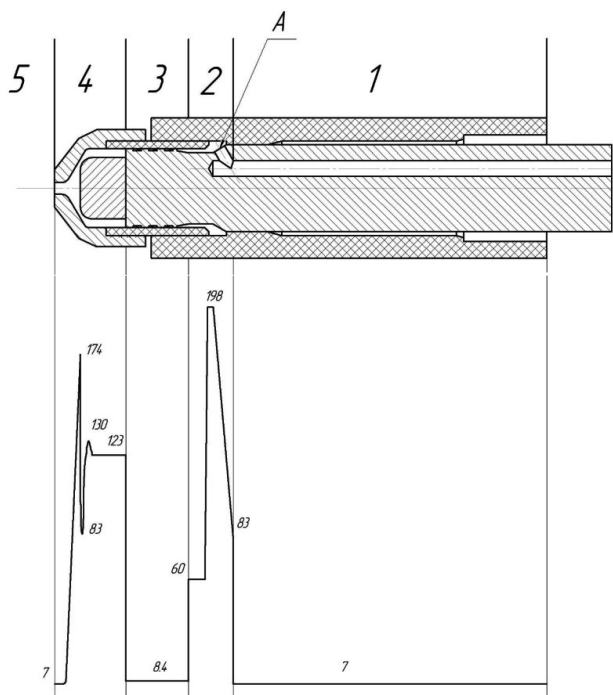


Рис. 6.10. Изменение площади поперечного сечения по ГВТ плазмотрона:

$A$  – точка ввода ПОГ из участка 1 в участок 2 (расширительная камера)

В противном случае, второй пик может появиться при соотношениях:

$$\begin{aligned} 1) & V_1 < V_2 \text{ и } S_2 > S_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{V_2}{V_1}}; \\ 2) & S_1 < S_2 \text{ и } V_2 > V_1 \cdot \left( 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (6.23)$$

Поэтому первым шагом, устраняющим возможность вихреобразования, должно стать придание конфузору формы, позволяющей не допустить резких изменений его поверхностного профиля. Для устранения такого рода вихреобразований коническую часть сопла следует сопрягать с цилиндрической плавной кривой, избегая резких перепадов площади проходного сечения на входе в цилиндрический канал сопла. Например, зная геомет-



рию сопла  $y_c$  (рис. 6.11), можно определить профиль катода  $y_k$  с заданным характером изменения площади проходного сечения  $F(x)$ :

$$y_k = \sqrt{y_c^2 - \frac{F(x)}{\pi \sqrt{1 + \left(\frac{dy_c}{dx_c}\right)^2}}}. \quad (6.26)$$

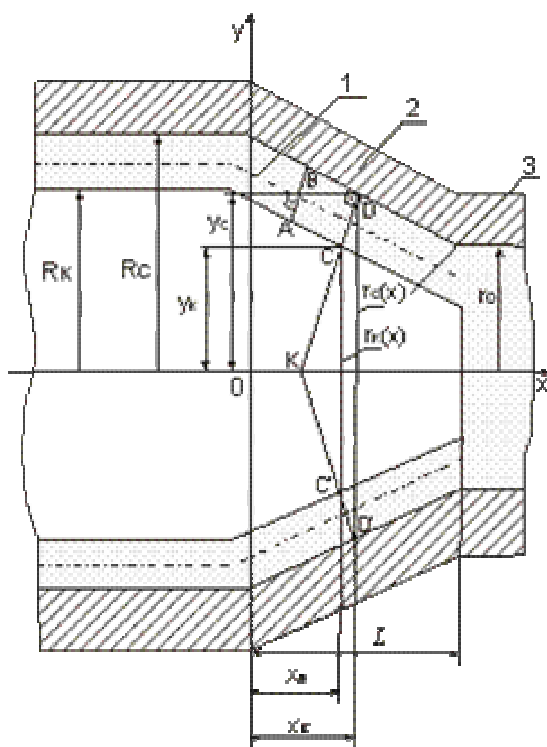


Рис. 6.11. Схема для проектирования соплового узла плазмотрона (базовый элемент – сопло):

$l$  – линия тока ПОГ (срединная поверхность канала); 2 – сопло; 3 – катод

В качестве базовой поверхности, формирующей проточную часть тракта, можно выбирать известные конфигурации: сопло Витошинского, экспоненциальные, катеноидальные, эквидистантные сопла и т. д. Выбор ширины канала  $l$  (между соплом и катодом) в случае проектирования по профилю сопла должен быть ограничен условием

$$l < y_c^{\min} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy_c}{dx_c}\right)^2}. \quad (6.25)$$

В некоторых случаях такое проектирование целесообразнее вести, отталкиваясь от профиля катода. Решение данной задачи, во-первых, по-

звolyет использовать достаточно широкую номенклатуру серийно выпускаемых катодов, а, во-вторых, избежать ограничений с подбором подходящей для заданного профиля сопла аппроксимации площади проходного сечения. В этом случае можно использовать любую функциональную зависимость  $F(x)$ , позволяющую произвести сопряжение площади ГВТ плазмотрона на входе в конфузорную часть соплового узла с площадью сечения в цилиндрической части сопла на выходе из нее. Формула для расчета координат сопла в этом случае:

$$y_c = \sqrt{y_k^2 - \frac{F(x)}{\pi \sqrt{1 + \left(\frac{dy_k}{dx_k}\right)^2}}} \quad (6.26)$$

Оценить эффективность такого проектирования можно, используя расчетные модели акустического излучения в звуковом и ультразвуковом диапазонах, представленные в [28]. Для оценки можно использовать результаты газодинамического анализа из п. 6.3.

Следующим шагом должен стать анализ возможностей формирования условий истечения плазменной струи, обеспечивающих минимальный уровень аэродинамического шума. С точки зрения акустической безопасности это означает технологически возможное уменьшение диаметра сопла плазмотрона и скорости истечения струи. Решение подобной оптимизационной задачи должно проводиться параллельно с газодинамическим анализом, выполняемым в п.6.3 рассматриваемой методики, что подразумевает повышение эффективности плазменной резки за счет улучшения условий газовихревой стабилизации. Рекомендации по соответствующим конструкторским решениям – оптимизация конструкции завихрителя по акустическим критериям (минимизация акустического ядра плазменной струи) в зоне смешения струи, а также применение двухпоточной системы обжатия струи по технологии «узкоструйной» плазмы в соответствии с упомянутыми в п.6.3 критериями.

## 6.6. Проектирование технологии и вспомогательного оборудования

На заключительном этапе проектирования должны быть определены технологические режимы работы плазмотрона и выбрано соответствующее вспомогательное оборудование.

Достигнутые за счет проектирования технологические преимущества анализируемых конструкций могут быть оценены по известным параметрическим уравнениям (2.2) для линейного однокамерного плазмотрона прямого действия ( $L$ ,  $d$  – длина и диаметр соплового канала), с учетом корректировки на величину давления в сопловом узле ( $p$ ), сделанной согласно приведенным выше расчетам [16]. По этим формулам могут быть определены вольтамперная характеристика  $U$ , напряженность дуги  $E$ , тепловой к.п.д. плазмотрона  $\eta$ , электрическая мощность дуги  $N$ , количество тепловых потерь  $Q_{\text{т}}$ .

При расчетах следует использовать результаты газодинамического анализа, выполненные в п. 6.3.

Эффективность проектирования плазмотронов можно также оценить по диапазонам критических для работоспособности и шумовой безопасности параметров. Следует учесть, что существуют минимальная и критическая мощности нагнетания ПОГ  $PQ$  ( $P$  – давление,  $Q$  или  $G$  – расход газа), при которых не будут обеспечены упомянутые в п. 6.3 критерии газодинамического проектирования, потери давления превысят допустимые значения или возникнут эффекты газодинамического и теплового заклинивания в сопле плазмотрона.

Расчетные оценки режимов работы плазмотрона (вольтамперные характеристики, рабочие диапазоны расходов и давлений газа) позволяют сделать выбор в отношении вспомогательного оборудования – источника питания с системой охлаждения, сменных и запасных частей, механизмов перемещения и управления процессом резки. В целях расширения сферы применимости и спроса на металлорежущую плазменную продукцию целесообразно при проектировании использовать элементы конструкции плазмотрона и технологии от зарекомендовавших себя в процессе эксплуатации производителей. Это позволит сделать процесс проектирования более простым, экономичным и эффективным.

## Заключение

В книге рассмотрены общие подходы, лежащие в основе проектирования плазменного оборудования. Задача проектирования плазмотронов должна решаться с учетом целого ряда принципов, которые можно классифицировать как принципы функциональности, системности и оптимальности. Особое внимание следует обратить на принцип безопасности, как правило, не принимаемый в расчет при конструировании плазмотронов, соблюдение которого, однако, подразумевает выполнение оптимизационных процедур (в соответствии с системным подходом в проектировании).

В представленном материале систематизированы методы, применяемые при проектировании плазмотронов. В отличие от 60–70-х гг. XX в., когда главенствовал экспериментальный подход, в настоящее время большая роль отводится формализованным машинным методам проектирования, ускоряющим процесс анализа и оптимизации конструкторских решений. Недостатками таких методов являются невысокая степень универсальности, функциональная и параметрическая неполнота анализируемых моделей. В то же время большую значимость для проектных процедур сегодня имеют эвристические подходы, использующие итерационные, конструктивные и иерархические методы. Их успешное применение существенно зависит от полноты используемых информационно-справочных моделей, созданных с опорой на широкую базу накопленных к настоящему времени решений в сфере проектирования плазмотронов.

Эффективность проектирования должна оцениваться различными методами автоматизированного и экспериментального анализа. В первом случае применение полученных в 70-е и 80-е гг. XX в. полуэмпирическими методами критериально-параметрических соотношений для однотипных плазмотронов требует коррекции, учитывающей новые конструктивные решения. Необходимо также уточнение газодинамических параметров процесса, определяющих эффективность работы плазмотрона, в свою очередь также зависящих от конструктивных особенностей плазмотрона и технологии его применения. Оценка эффективности проектирования по результатам экспериментальных исследований и испытаний в настоящее время может опираться на широкий круг методов, ряд из которых, в первую очередь при анализе факторов безопасности, требует разработки специфичных для плазменных технологий методик измерения.

В работе также сформулированы функциональные и конструктивные признаки классификации плазмотронов для сварочных и экологических технологий. Систематизированы и проанализированы общие принципы и методы их конструирования. Отмечено, что наибольшую трудность представляет процесс проектирования технологии обезвреживания токсичных отходов дисперсного состава, требующий мультипараметрического учета свойств нагреваемого материала и плазмообразующей среды, конструктивной и функциональной оптимизации применяемого оборудования.

В работе представлен также комплекс параметров, определяющих эффективность проектирования по критериям функциональности, качества и безопасности. В ряду этих критериев есть как нормируемые стандартами величины, так и специфичные для конкретной технологии. Предложен квалиметрический метод оценки эффективности проектирования по таким критериям. Показано, что оптимальным решением задачи повышения эффективности работы плазмотронов для резки является развитие внедряемой в настоящее время технологии точной (сжатой) плазмы, которая имеет улучшенные характеристики по большей части параметров, определяющих эффективность проектирования и работы плазморезательного оборудования.

Необходимость учета представленных в данной монографии принципов и методов проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях формирует перед разработчиками соответствующего оборудования широкий круг задач, в то же время показывая основные направления их решения. Например, для разработчиков плазморезательного оборудования полезной должна быть представленная в книге методика автоматизированного проектирования металлорежущих плазмотронов по газодинамическим, теплофизическим и акустическим критериям. Ну, а для потребителей данных технологий рассмотренная в книге информация позволит сделать грамотный и квалифицированный выбор при приобретении соответствующего оборудования.

## Библиографический список

1. *Алешин Н. П.* Современные способы сварки / Н. П. Алешин, В. И. Лысак, В. Ф. Лукьянов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 59 с.
2. *Стеклов О. И.* Основы сварочного производства / О. И. Стеклов. Москва: Высшая школа, 1981. 160 с.
3. *Mussmann J.* Stand der Bearbeitung von ISO 4063:2009 «Schweissen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern» / J. Mussmann // Schweissen und Schneiden. 2010. № 7–8. S. 430–433.
4. *Курнаев В. А.* Плазма – XXI век / В. А. Курнаев. Москва: Изд-во МИФИ, 2008. 80 с.
5. *Клименко А. А.* Конструкции электродуговых плазмотронов / А. А. Клименко, Г. К. Ляпин. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 56 с.
6. *Электродуговые плазмотроны: рекламный проспект* / А. С. Анышаков [и др.]; под ред. М. Ф. Жукова; Ин-т теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1980. 84 с.
7. *Чередниченко В. С.* Плазменные электротехнологические установки / В. С. Чередниченко, А. С. Анышаков, М. Г. Кузьмин. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 602 с.
8. *Дресвин С. В.* Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии / С. В. Дресвин, С. Г. Зверев. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 208 с.
9. *Орлов П. И.* Основы конструирования: справочник: в 2 книгах / П. И. Орлов. Москва: Машиностроение, 1988. 560 с.
10. *Хорошев А. Н.* Введение в управление проектированием механических систем / А. Н. Хорошев. Белгород: [Б. и.], 1999. 372 с.
11. *Лащенко Г. И.* Плазменная резка металлов и сплавов / Г. И. Лащенко. Киев: Экотехнология, 2003. 64 с.
12. *Дресвин С. В.* Основы математического моделирования плазмотронов: учебное пособие / С. В. Дресвин, Д. В. Иванов. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. Ч. 1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы. 227 с.
13. *Дресвин С. В.* Основы математического моделирования плазмотронов: учебное пособие / С. В. Дресвин, Н.-К. Ши, Д. В. Иванов. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. Ч. 3: Уравнения движения плазмы. Методика расчета скорости плазмы в плазмотронах. 132 с.

14. *Физика и техника низкотемпературной плазмы* / С. В. Дресвин [и др.]. Москва: Атомиздат, 1972. 352 с.
15. *Жуков М. Ф. Основы расчета плазмотронов линейной схемы* / М. Ф. Жуков, А. С. Аньшаков; Ин-т теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1979. 146 с.
16. *Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма)* / М. Ф. Жуков [и др.]. Новосибирск: Наука, 1999. Т. 17. 712 с.
17. *Жуков М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны)* / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. Москва: Наука, 1973. 232 с.
18. *Экспериментальные исследования плазмотронов* / под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 390 с.
19. *Плазмотроны. Исследования. Проблемы: монография* / М. Ф. Жуков [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. 203 с.
20. *Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы* / Ф. Г. Рутберг, И. А. Глебов. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
21. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы: в 9 томах* / гл. ред. В. Е. Фортов. Москва: Наука, 2000. Т. 1: Низкотемпературная плазма. Основные понятия, свойства и закономерности. 88 с.
22. *Кайдалов А. А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов* / А. А. Кайдалов. Киев: Эко-технология, 2007. 456 с.
23. *Бернадинер М. И. Огневая переработка и обезвреживание отходов* / М. И. Бернадинер, А. П. Шурыгин. Москва: Химия, 1990. 302 с.
24. *Пыкин Ю. А. Технологии плазменной переработки отходов глиноземного производства алюминиевых заводов* / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов // Экология производства: Металлургия и машиностроение. 2007. № 4(9). С. 4–6.
25. *Пыкин Ю. А. Разработка технологии термической переработки органических отходов с плазменным обезвреживанием* / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов // Безопасность в техносфере. 2010. № 4. С. 26–32.
26. *Анахов С. В. Оптимизация технологии низкотемпературного плазменного обезвреживания нефтесодержащих отходов* / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. 2010. № 2–2. С. 177–184.
27. *Анахов С. В. Основы безопасности электроплазменных процессов* / С. В. Анахов; Рос. гос. проф.-пед. ун-т. Екатеринбург, 2009. 49 с.
28. *Анахов С. В. Плазмотроны: проблема акустической безопасности* / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 224 с.

29. *Васильев К. В.* Плазменно-дуговая резка / К. В. Васильев. Москва: Машиностроение, 1974. 111 с.
30. *Быховский Д. Г.* Плазменная резка / Д. Г. Быховский. Ленинград: Машиностроение, 1972. 166 с.
31. *Коротеев А. С.* Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчет / А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. Москва: Машиностроение, 1993. 296 с.
32. *Кручинин А. М.* Плазменные промышленные установки. Промышленные плазмотроны / А. М. Кручинин, В. П. Цишевский. Москва: Изд-во МЭИ, 1991. 103 с.
33. *Даутов Г. Ю.* Плазмотроны со стабилизированными дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. Киев: Наукова думка, 1984. 168 с.
34. *Ширшов И. Г.* Плазменная резка / И. Г. Ширшов, В. Н. Котиков. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 192 с.
35. *Журавлев В. Ф.* Основы применения структурно-функционального метода в учебном процессе и исследованиях. Кибернетический подход / В. Ф. Журавлев, И. А. Ридингер, Т. В. Рыжкова. Екатеринбург: АМБ, 2011. 152 с.
36. *Анахов С. В.* Интегративные элементы физической модели «Плазмотрон» / С. В. Анахов // Физическое образование в вузах. 2011. № 2. С. 69–75.
37. *Основы физических процессов в плазме и плазменных установках* / С. К. Жданов [и др.]. Москва: Изд-во МИФИ, 2000. 184 с.
38. *Анахов С. В.* Влияние активных газовых компонент на эффект плазменного поверхностного упрочнения / С. В. Анахов // Сварочное производство. 2011. № 9. С. 26–33.
39. *Фролов В. Я.* Плазменные электротехнологические установки и технологии / В. Я. Фролов, С. В. Дресвин, Д. В. Иванов // Высокоэнергетические методы обработки материалов: сборник / под ред. В. Б. Демидовича. Санкт-Петербург: Изд-во ЛЭТИ, 2008. С. 150–250.
40. *Лащенко Г. И.* Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. Киев: Экотехнология, 2003. 64 с.
41. *Высокоэнергетические процессы обработки материалов* / О. П. Солоненко [и др.]. Новосибирск: Наука, 2000. 425 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 18).
42. *Плазменное поверхностное упрочнение* / Л. К. Лещинский [и др.]. Киев: Техника, 1990. 109 с.



43. *Безопасность* технологических процессов и производств (Охрана труда): учебное пособие для вузов / П. П. Кукин [и др.]. Москва: Высшая школа, 2002. 319 с.
44. *Безопасность* производственных процессов: справочник / С. В. Белов [и др.]; под общ. ред. С. В. Белова. Москва: Машиностроение, 1985. 448 с.
45. *Борьба с шумом на производстве*: справочник / Е. Я. Юдин [и др.]; под общ. ред. Е. Я. Юдина. Москва: Машиностроение, 1985. 400 с.
46. *Пыкин Ю. А.* Факторы снижения шумов при работе плазменного оборудования / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов // *Технология машиностроения*. 2008. № 7. С. 64–67. = *Pykin Yu. A.* Methods of reducing noise in operation of plasma equipment / Yu. A. Pykin, S. V. Anakhov // *Welding International*. 1996. Vol. 10, № 11. P. 890–892.
47. *Анахов С. В.* Шумообразующие факторы в технологиях высокоэнергетического воздействия на материалы / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, О. И. Стеклов // *Сварочное производство*. 2004. № 10. С. 47–50. = *Anakhov S. V.* Noise forming factors in high-energy treatment of materials / S. V. Anakhov, Yu. A. Pykin, O. I. Steklov // *Welding International*. 2005. Vol. 19. № 3. P. 246–248.
48. *Анахов С. В.* Плазменные технологии для экологизации производств / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // *Безопасность в техносфере*. 2011. № 5. С. 45–53.
49. *Ластовирия В. Н.* Оптимизация в автоматизированном проектировании сварочных технологий / В. Н. Ластовирия, Э. А. Гладков, А. В. Коновалов. Москва: Изд-во МГИУ, 2008. 184 с.
50. *Малаховский В. А.* Плазменная сварка / В. А. Малаховский. Москва: Высшая школа, 1987. 80 с.
51. *Малаховский В. А.* Плазменные процессы в сварочном производстве / В. А. Малаховский. Москва: Высшая школа, 1988. 72 с.
52. *Анахов С. В.* Методика акустического проектирования соплового узла плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // *Технология машиностроения*. 2012. № 10. С. 27–32.
53. *Анахов С. В.* Особенности акустического проектирования соплового узла плазмотрона по катодному профилю / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // *Технология машиностроения*. 2012. № 6. С. 38–43.
54. *Эсибян Э. М.* Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы / Э. М. Эсибян // *Автоматическая сварка*. 2000. № 12. С. 6–16.
55. *Донской А. В.* Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. Ленинград: Машиностроение, 1979. 221 с.

56. *Анахов С. В.* Сравнительный анализ газодинамических факторов шумоизлучения плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // Сварочное производство. 2005. № 1. С. 31–36. = *Anakhov S. V.* Gas-dynamic factors of noise emission from plasma torches / S. V. Anakhov, Yu. A. Pykin // *Welding International*. 2005. Vol. 19. № 6. P. 490–494.

57. *Анахов С. В.* Плазмотрон как резонансный акустический излучатель / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // Физическое образование в вузах. 2011. № 3. С. 66–77.

58. *Анахов С. В.* Особенности профилирования газоздушных трактов малошумных плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // Сварочное производство. 2011. № 6. С. 40–44. = *Anahov S. V.* Special features of design of the profile of gas-air circuits of low-noise plasma torches / S. V. Anakhov, Yu. A. Pykin, A. V. Matushkin // *Welding International*. 2012. Vol. 26. Issue 10. P. 819–822.

59. *Принципы* безопасного проектирования газоздушных трактов плазмотронов / С. В. Анахов [и др.] // Сварочное производство. 2012. № 3. С. 39–43.

60. *Газодинамические* особенности проектирования плазмотронов / С. В. Анахов [и др.] // Сварочное производство. 2011. № 12. С. 10–15.

61. *Особенности* теплофизического проектирования плазмотронов для резки металлов / С. В. Анахов [и др.] // Сварочное производство. 2011. № 11. С. 25–30.

62. *Дзюба В. Л.* Конструктивные особенности электродуговых узлов режущих плазмотронов / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, А. В. Сумец // Вісник СНУ ім. В. Даля. Луганськ, 2009. № 6.

63. *Дзюба В. Л.* Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2007. 448 с.

64. *Плазмотрон*: патент № 67909 на полезную модель / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов, С. А. Шакуров, А. Г. Тетюков. 2007. 22 мая. 6 с.

65. *Плазменная горелка (варианты)*: патент № 2353485 (C1) / В. С. Тверской, А. В. Тверской. 2007. 13 июля. 5 с.

66. *Лисовский С. М.* Системотехническое проектирование электроплазменных технологий и оборудования: диссертация ... доктора технических наук / С. М. Лисовский; Саратовский ГТУ. Саратов, 2006. 405 с.

67. *Уайлд Д.* Оптимальное проектирование / Д. Уайлд. Москва: Мир, 1981. 272 с.

68. *Анахов С. В.* Экологическое проектирование: стратегии и технологии / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing: AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, 2012. 125 с.

69. *Кудинов В. В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технологии, оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. Москва: Металлургия, 1992. 432 с.

70. *Исакаев Э. Х.* Разработка генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода и некоторые его применения: диссертация ... доктора технических наук в форме научного доклада / Э. Х. Исакаев. Москва: ОИВТ РАН, 2002. 84 с.

71. *Manochar M.* Dross formation during Plasma Arc Cutting of steels / M. Manochar, J.-P. Snyder // *Welding Journal*. 1994. № 11. P. 45–51.

72. *Шухмайстер В. Л.* Повышение качества кромок при воздушно-плазменной резке / В. Л. Шухмайстер, В. Т. Котик // *Сварочное производство*. 1981. № 3.

73. *Исследование* поверхности реза при термической разделительной резке стали 09Г2С / С. В. Анахов [и др.] // *Сварочное производство*. 2007. № 7. С. 18–21. = *Examination of the cut surface in thermal cutting of 09G2S steel* / S. V. Anakhov [et al.] // *Welding International*. 2008. Vol. 22. № 4. P. 267–270.

74. *Krink V.* Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete / V. Krink, H. Simler, F. Laurisch // ICCT 2006: Internationale Schneidtechnische Tagung; Vorträge der gleichnamigen Konferenz. [Hannover, 10 und 11 Oktober 2006]. S. 18–25.

75. *Азгальдов Г. Г.* Оценка вариантов проекта на основе упрощенной разновидности метода квалиметрии / Г. Г. Азгальдов, В. С. Нагинская. Москва: Изд-во МИСИ, 1982. 69 с.

76. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. Москва: Наука, 1991. Ч. 1. 597 с.

77. *Костылев А. М.* Электродуговые установки (плазмотроны) / А. М. Костылев. Москва: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1969. 109 с.

78. *Газовыхревая стабилизация* в плазмотронах: новые решения / С. В. Анахов [и др.] // *Сварочное производство*. 2015. № 5. С. 49–53.

79. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. Москва: Наука, 1972. 721 с.

## Приложение

### Информационно-справочные модели плазменного оборудования

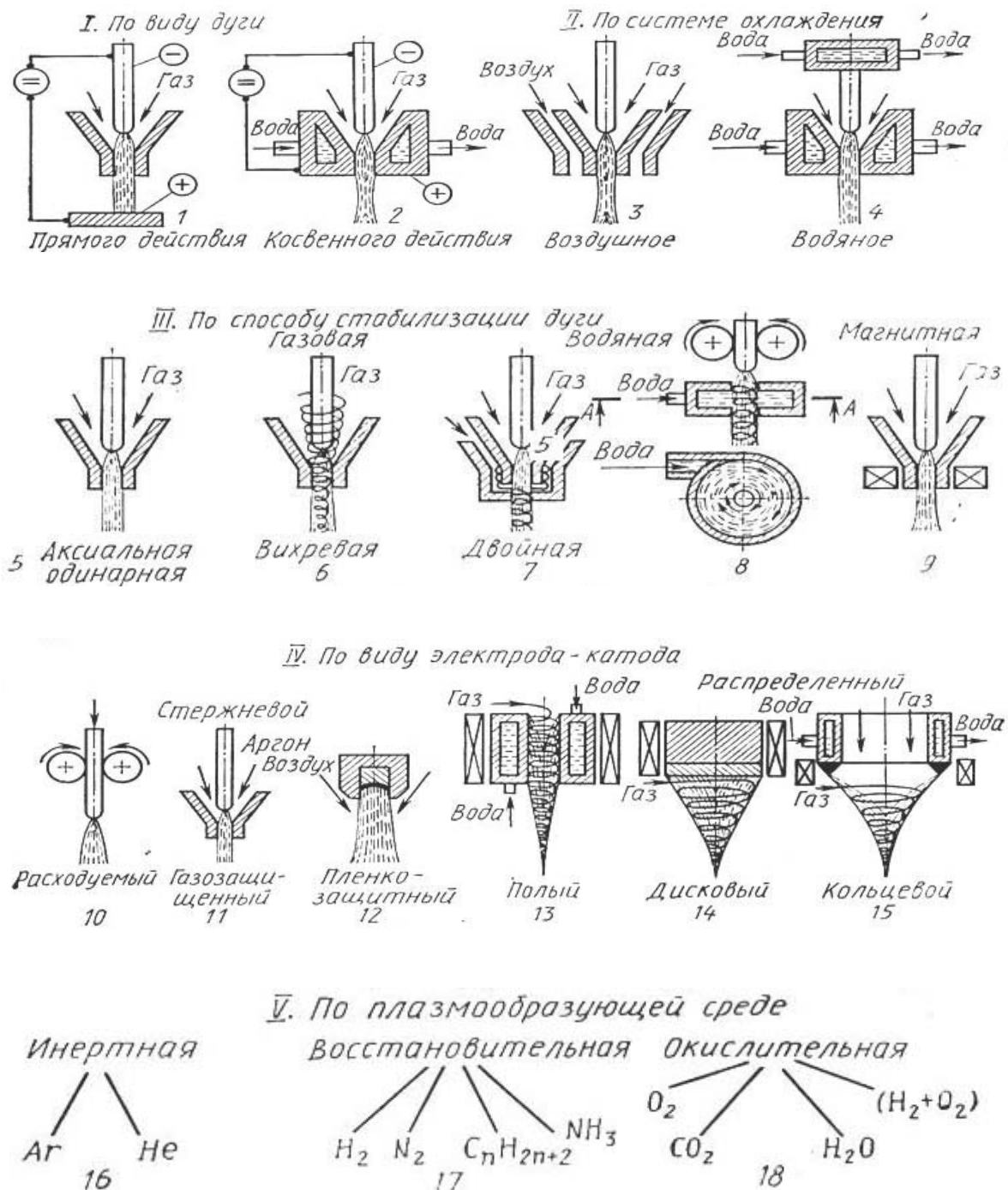


Рис. 1. Классификация плазмотронов В. А. Малаховского [51]

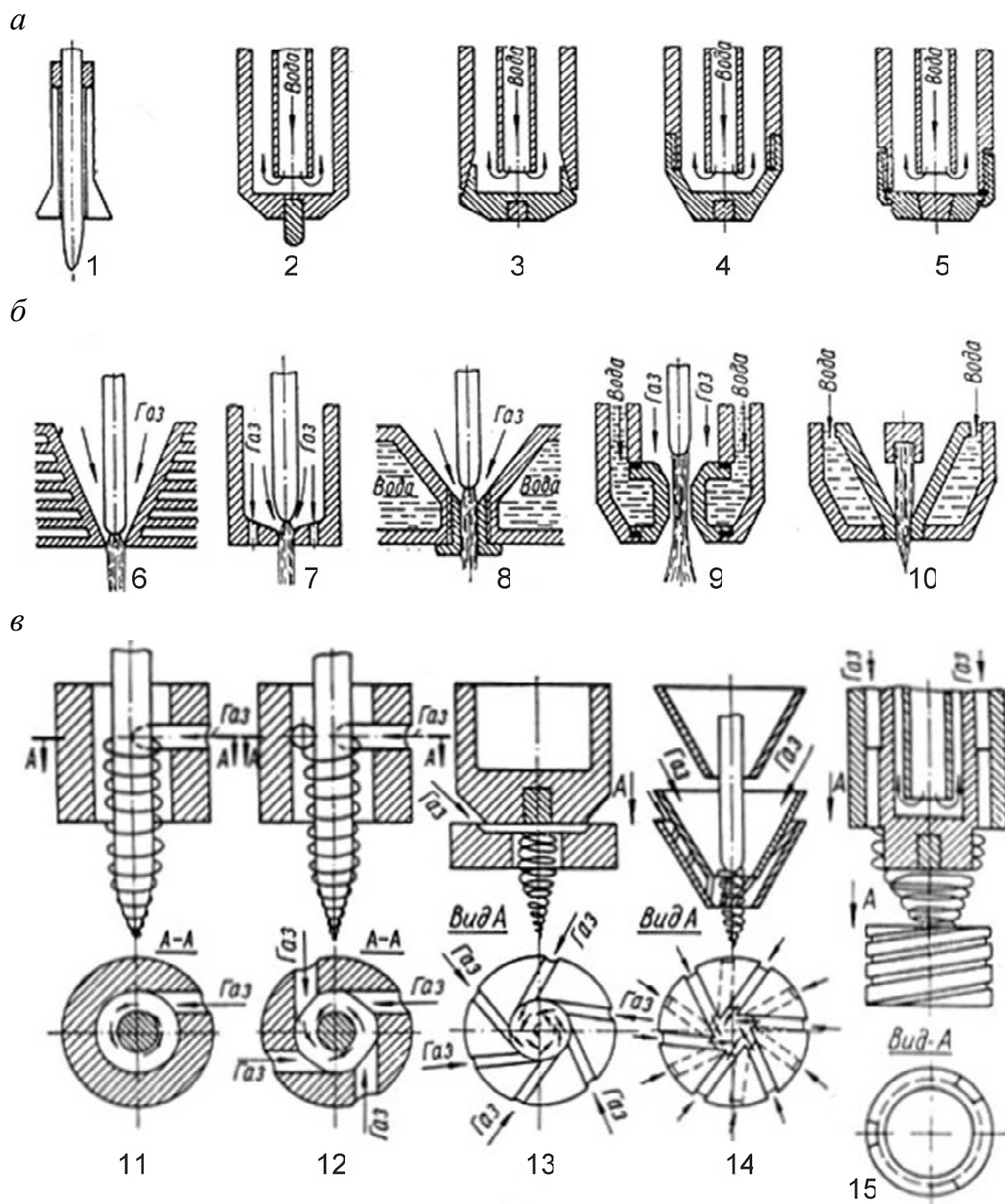


Рис. 2. Схемы элементов режущих плазматронов [29]:

*а* – катоды: 1 – цанговый неохлаждаемый катод; втулочные катоды: 2 – впаянный; 3 – с конусной посадкой; 4 – с резьбой; 5 – с накидной гайкой (2–5 – катоды, охлаждаемые проточной водой); *б* – формирующие сопла: 6 – с естественным охлаждением; 7 – с охлаждением рабочим газом; 8 – сопло-втулка с резьбой; 9 – сопло-вставка с уплотнениями; 10 – составное сопло; *в* – завихрители: 11, 12 – подача газа в дуговую камеру по каналам, расположенным по касательной; 13 – завихрительная шайба из жаростойкой керамики; 14 – составное сопло-завихритель (три плотно вложенных друг в друга конуса с завихрительными каналами); 15 – резьбовой завихритель

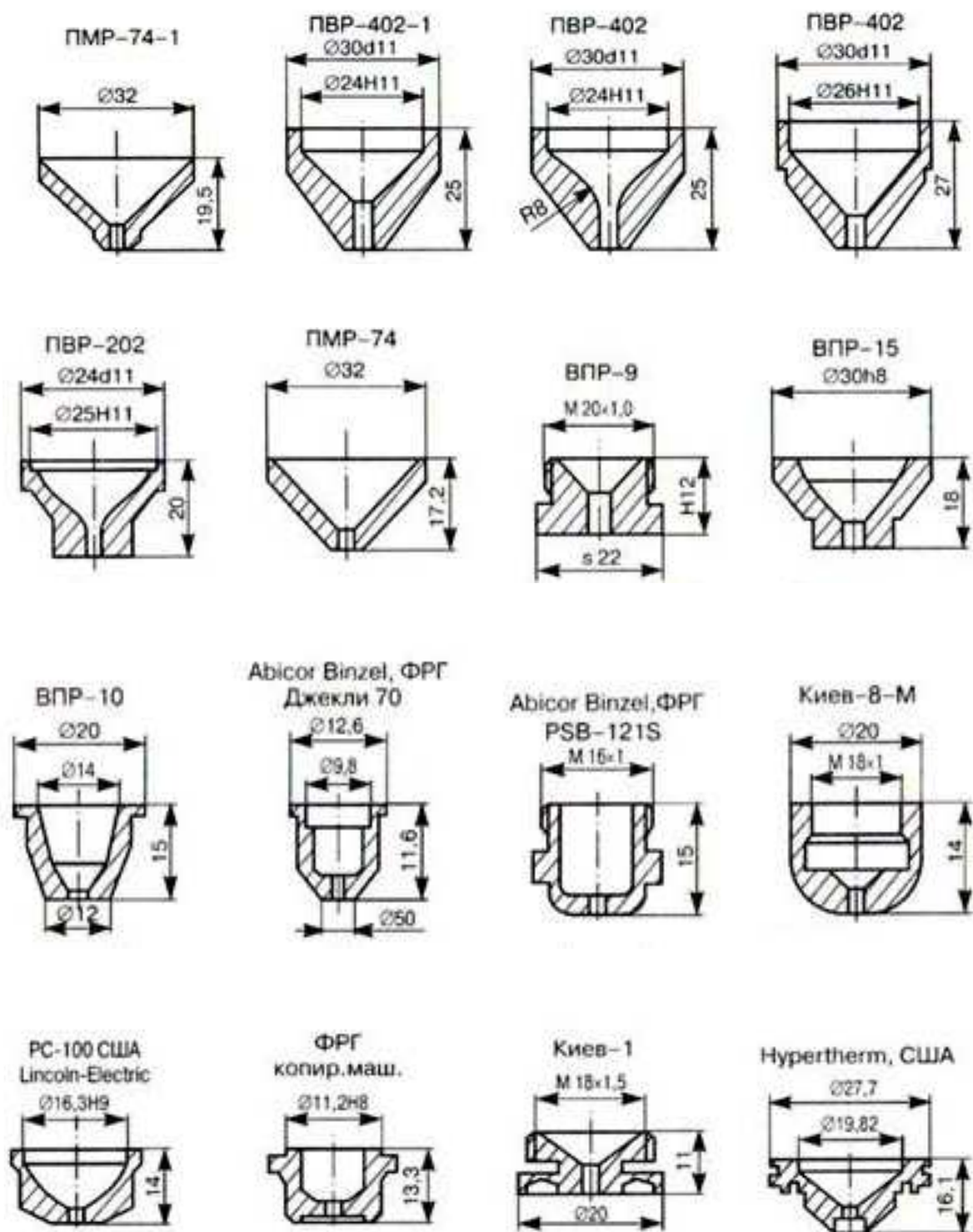


Рис. 3. Сопла к плазмотронам для плазменно-дуговой резки металлов [22]



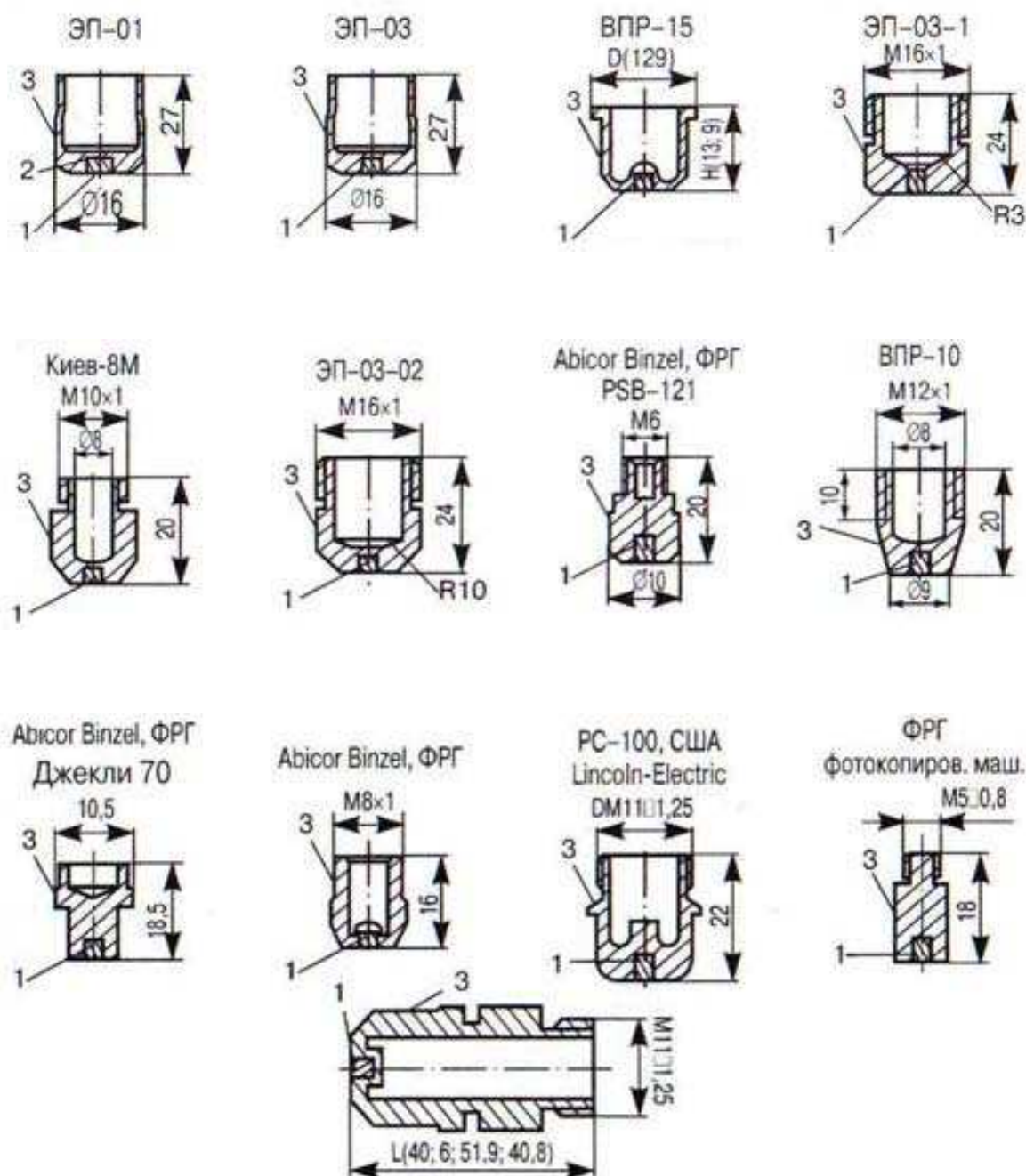


Рис. 4. Электроды к плазмотронам для плазменно-дуговой резки металлов [22]:

1 – вставка; 2 – фольга; 3 – корпус

Научное издание

*Анахов* Сергей Вадимович

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАЗМОТРОНОВ

Монография

Редактор Т. В. Шептунова

Компьютерная верстка Н. А. Ушениной

Печатается по постановлению  
редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 16.11.18. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов.  
Печать плоская. Усл. печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 8,4. Тираж 500 экз. Заказ № \_\_\_\_.  
Издательство Российского государственного профессионально-педагогического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

---